

行政院國家科學委員會

八十八年度石油暨石化產業科技學術合作研究計畫

功能性高分子應用技術開發一子計畫十四：

高分子薄膜之形態對精密過濾效率的影響及其應用

中華民國 89 年 01 月

功能性高分子應用技術開發一子計畫十四：
高分子薄膜之形態對精密過濾效率的影響及其應用

期末報告

委託單位：中國石油股份有限公司

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：88-CPC-E-032-013

執行期間：88 年 4 月 1 日至 88 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃國楨

共同主持人：

執行單位：淡大化學工程學系

中文摘要

為了將高分子薄膜有效率地應用於精密化工程序中，本研究針對高分子薄膜之形態進行解析，探討薄膜之形態及操作條件粒子結垢(fouling)機構的影響，由其微粒子之阻截效率與固液分離效率歸納出各種高分子薄膜之適用時機。本研究採用三種不同表面形態之高分子薄膜，MF薄膜、Durapore薄膜及Isopore薄膜，進行實驗，探討掃流速度、過濾壓差、粒子大小及薄膜形態對於濾速的影響。在固定掃流速度之下，當過濾壓差遞增時，三種高分子薄膜之濾速雖然也同時增加，但是三種薄膜相對的濾速差距會加大，其原因與薄膜表面形態有極大的關係。MF薄膜因其有較多、較深且較為開放之表面孔洞，因此粒子較容易受到壓力的作用而附著及阻塞於表面孔洞之中，甚至會阻塞於更深入之孔洞結構之中，當壓力大到某一範圍時，濾速反而會因為粒子嚴重阻塞薄膜孔道而降低；而Durapore薄膜因其表面有一表皮層，粒子只能阻塞於表面之表皮層，無法阻塞於更內部之孔道；至於Isopore薄膜表面孔隙較少，其形態為一圓孔，粒子不易在表面直接阻塞孔隙，因此其濾速為三種薄膜中最高，也是因其之孔隙較少被粒子阻塞，濾液較有機會通過，至於所生成的濾餅性質方面，因為過濾壓差增加，濾餅會滾落至最穩定的位置，造成濾餅之孔隙度變小。在固定過濾壓差之下，當掃流速度遞增時，因為粒子較易受到流體拖曳而帶離薄膜表面，對於掃流速度之影響，掃流速度越高（雷諾數為325~1079皆為層流範圍內）可以得到越高的濾速，這是因為掃流速度越高，掃流剪切力增加，使得濾餅不易生成，濾速自然也會較高，這也證明了掃流過濾能抑制濾餅生長的優點。此外，由實驗之SEM圖，可以得到較為清楚的粒子阻塞及堆積情形，並清楚的看出粒子在高分子薄膜表面附著，不同表面形態高分子薄膜對於粒子附著的影響十分明顯。由本實驗的結果，可提供過濾薄膜選擇的參考。

ABSTRACT

Cross-flow microfiltration is an economic mode of solid-liquid separation. This unit operation has been widely used for separation of fine particles or colloids in various fine chemical processes. Its high filtration efficiency is mainly determined by the good use of filter membrane and the optimum operating conditions; therefore, how to select a suitable filter membrane is the main course of this field. In this study, the effects of membrane morphology and operating conditions on the efficiency of microfiltration are discussed. Three kinds of membranes, MF, Durapore and Isopore membrane, are selected for filtration experiments. The filtration rate increases with increasing filtration pressure for three kinds of membranes. Particles can easily deposit on or block in a MF membrane due to more open pores existed on the membrane; therefore, the filtration rate will decrease for a high filtration pressure. The blocking of a Durepore membrane occurs only on its skin layer. The efficiency of a Durepore membrane depends on its nominal porosity and pore structure. A Isopore will result in a highest filtration rate among the selected sample membranes because rare blocking occurs in its straight circular pores. On the other hand, the filtration rate increases with increasing cross-flow velocity due to the tangential shear acting on the membrane surface. Some suggestions for the membrane selection are proposed from the microscopic view points of particle retention and separation efficiency.

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
第一章 緒論	1
第二章 文獻回顧	6
2-1 掃流微過濾之特性	6
2-2 掃流微過濾之理論模式	9
2-3 薄膜表面形態之研究	21
第三章 理論	24
3-1 粒子附著之臨界摩擦角度	24
3-2 粒子之黏著機構	30
3-3 粒子之結垢模式	31
第四章 研究方法	37
第五章 實驗內容	41
5-1 實驗裝置	41
5-2 實驗步驟	43
第六章 實驗結果	48

6-1 操作條件與薄膜種類對於濾速的影響	49
6-2 薄膜阻力的分析	55
第七章 結論	70
第八章 建議	73
致謝	75
符號說明	76
參考文獻	78
附錄	88

第一章、緒論

由於科技的突飛猛進，使得產業的各結構改變，從過去的石油工業、食品工業，而至今日的精密陶瓷與材料工業，電子業的製程，及環保的污染防治，以致於未來頗被看好的生化及生醫科技，都需要分離技術的應用。在這些精密分離程序中，所遭遇的粒子經常是微粒子 (fine particles)、膠體 (colloids)、或巨分子 (macro molecules) 等難過濾的物質。薄膜過濾漸廣泛的在實驗室及工業界使用，這些由纖維酯或高分子合成的膜，其優點除了成本較低廉外，更重要的是它可針對過濾的對象做膜孔洞的選擇，因此像較難過濾的如螺旋體，原生病菌、微細膠體粒子及小至巨型蛋白質等等都能有效的阻擋下來。

在生物技術中，回收發酵槽產品的純化操作成本，常花費大量的生產成本。目前所使用之方法以掃流過濾 (cross-flow filtration) 及超高速離心為主，而掃流過濾有低操作成本、低剪力、程序控制簡單等優點。

過濾的方法可分成許多種類，若以流體流動方向與濾面之間的關係則可分成濾餅過濾（cake filtration）及掃流過濾（cross-flow filtration）兩種。濾餅過濾是以壓力差為驅動力，將懸浮液直接壓向濾面，通過濾材而得到澄清液。這種過濾方式，隨著過濾的進行，被阻擋的粒子累積在濾面上形成阻力，導致濾速降低而使過濾無法持續進行。而離心過濾亦是用相似的原理，只是用離心力替代壓力差作為驅動力，其優點是驅動力大、效率高；但若泥漿或懸浮液含次微米級粒子時，則易產生阻塞（fouling），使分離效果不佳；另外，若再考慮產品為對剪力較敏感的生化產品時，其高剪力容易破壞粒子，不僅影響產品品質，亦會增加過濾比阻。

另一種以流體流動方向平行流過濾面，而濾液則垂直通過濾膜，並且以壓力作為驅動力的便是掃流過濾。其特性利用即是利用流體掃過濾面的剪應力量抑制濾餅的持續成長，也因此掃流過濾得以連續長時間的操作，大大的改善了濾餅過濾的不便。根據所欲分離粒子的尺寸與操作條件，掃流過濾可區分成微過濾

(Microfiltration)，超過濾 (Ultrafiltration) 以及逆滲透 (Reverse Osmosis) 等新分離技術領域。

將掃流過濾與傳統之濾餅過濾來加以比較，有以下優點：

- (1) 因濾餅成長受到掃流速度限制，因此有較高的過濾速度，也可長時間連續操作。
- (2) 懸浮液的流向垂直於濾液的流動方向，因此細微的粒子被帶到濾面的機率較低，所以可得澄清度較高的濾液。
- (3) 不必添加助濾劑，絮凝劑等物質，可避免不必要的夾雜物並維持產品的品質。

薄膜種類與操作條件的選擇是決定過濾效率的重大因素。然而，大部分研究者的眼光都放在操作條件上，在薄膜選擇的研究上卻仍相當缺乏。隨著高分子特用化學品的研究日殷，可作為過濾介質的多孔性高分子薄膜之種類亦日益繁多。然而，舉凡高分子的材質、形態/結構、空隙之孔徑等，皆可能對微粒子之分離效率有決定性的影響。故絕非像過去僅以膜之表面

孔徑 (nominal diameter)、分子量截取 (molecular weight cutoff) 或其親疏水性即可成功選取適當之過濾薄膜。

為了將高分子薄膜有效率地應用於精密化工程序中，本研究對次微米粒子之過濾分離的微觀分析專長與研究成果，針對高分子薄膜之形態進行解析，探討薄膜之形態對懸浮液流態以及粒子結垢 (fouling) 機構的影響，配合理論模式的分析，由其微粒子之阻截效率與固液分離效率歸納出各種高分子薄膜之適用時機，將研究成果應用於各項精密化工程序。

研究項目包含：

1. 以流體力學探討濾膜形態對懸浮液流態的影響。
2. 探討微粒子及膠體粒子在掃流微過濾器中之運動與輸送。
3. 探討粒子及膠體在濾膜表面上之附著機構及其過濾阻力。
4. 探討粒子及膠體在濾膜孔道中之附著或結垢機構。

5. 探討濾膜形態對微粒子及膠體掃流微過濾的影響。

第二章、文獻回顧

2-1 掃流微過濾之特性

對於掃流過濾的研究，針對實驗過程中之濾速衰減現象，多以實驗的方式研究操作變數（如壓力、掃流速度、濃度、粒徑、薄膜孔徑等）對過濾特性之影響，針對過去相關的研究分別整理如下：

Baker 等人（1985）發現在過濾過程中，若進料泥漿含高比例之微細粒子時，形成濾餅中微細粒子所佔比例會隨著過濾時間的增加而增加，因此過濾阻力也增加。

Fischer 與 Raasch（1985）以碳酸鈣泥漿進行掃流過濾實驗，其研究發現當懸浮液於不同粒徑分佈下，掃流對在濾面上附著之粒子具有篩選的作用，所以掃流速度增加，濾餅量會隨之減少，相對地過濾比阻增加而造成濾速的降低。

Rushton 和 Zhang（1988）則利用環狀旋轉式濾材過濾碳酸鈣和矽酸鈣泥漿。在高掃流速度下，也發現附著之平均粒徑遠小於進料泥漿之平均粒徑。

Reismers 等人 (1989) 實驗研究中以平板和管式二種模組過濾 *E. Coli* 和 *S. cerevisiae* 泥漿，並配合不同之濾材分別探討粒徑之特性。其結果顯示：增加過濾壓力及泥漿濃度會使得濾餅量增加，因過濾阻力增加而濾速衰減。另外，在低過濾壓力下，大粒子很容易被掃走，濾餅由微小粒子緊密堆積生成，而使得掃流微過濾所形成之濾餅比阻較傳統垂直過濾來得大。

Wakeman 與 Tarleton (1993) 則探討在掃流微過濾實驗中，粒徑及薄膜孔徑對濾速衰減的影響。他們就粒徑而言，微粒子過濾時濾速衰減相當快迅速，過濾特性和薄膜孔徑有相互關聯。

Wakeman 與 Tarleton (1994) 則更進一步研究探討在不同之操作參數（如過濾壓力、掃流速度、泥漿濃度、粒子表面性質）對濾速衰減之影響以及粒徑、粒徑分佈和粒子形狀與各操作條件之相互關係，可得下列幾項結論：

1. 增加過濾壓力可提昇濾速，但也會加速薄膜結垢使得微粒阻塞孔道，造成濾速衰減。

2. 高掃流速度下，大的粒子會被流體帶走而泥漿流體只剩微細會附著於薄膜上或形成一濃度層，而造成過濾阻力增加而降低濾速。在低濾速下，由於掃流之流體無法克服剪切力而使得粒子附著於薄膜上。
3. 一般而言，增加泥漿濃度會降低濾速，對微小粒子在過濾初期濾速衰減相當快速，並也影響粒子之排列或堆積。當進料之泥漿濃度很高，過濾時會發生粒子會在薄膜表面形成架橋堆積，而不是阻塞。若低泥漿濃度時，粒子會在孔道中阻塞。所以過濾初期，因濾餅形成或薄膜孔道阻塞而使得過濾阻力增加濾速衰減迅速。
4. 粒子表面性質之影響，由於粒子之界達電位具有分散之效果。若存在於長距離之排斥力時，所形成高孔隙度之濾餅層。粒子之表面性質接近於等電位點時，受短距離之吸引力之支配而使得粒子堆積密度明顯提高。

Shrman 與 Mackley(1992)利用聚苯乙烯懸浮溶液分別探討靜態過濾和動態過濾條件下濾餅解析，他們推測於靜態過濾時過濾體積、濾餅厚度與時間之開方

根 ($t^{0.5}$) 有關，並發現濾餅阻力與壓力無關。然而，在動態過濾時，掃流會抑制濾餅成長，同時也會降低濾速，並利用光學儀器來觀測粒子在濾面上粒子附著情形，也印證粒子附著模式與實驗數據完全吻合。

Jiao與Sharma (1994) 研究膠體懸浮粒子在泥漿運動中粒子受力的影響，並利用幕次模式來探討濾餅的成長機構。其結果發現，濾面上之濾餅厚度為時間的函數，隨著時間的增長而濾餅量會逐漸減少。在過濾初期，粒子受較大之流體拉曳力而使得粒子未經篩選完全的附著於濾面上，而呈非均勻性堆積成長。而後，附著粒子會愈來愈小而濾餅量會逐漸降低，直至達穩定濾速時，濾餅將會停止成長。

2-2 掃流微過濾之理論模式

對於掃流過濾的研究，早期多以巨觀性質來探討實驗中各種操作變數對過濾特性的影響。在操作過程中，造成濾速衰減之原因與許多因素有關，例如操作條件、粒子性質、泥漿性質、濾材特性等，相當複雜。但從過去之研究中仍有不少是以微觀的觀點來探討掃流過濾

器內的過濾機構，並且配合理論模式分析實驗數據。

所以有關於掃流微過濾之理論模式大致可分於下列三種模式：

I. 濃度極化模式

掃流微過濾（CFMF）與超過濾（UF）有許多相似的地方，所以 UF 中的濃度極化模式最早被延用於預測 CFMF 的濾速。在過濾過程中，粒子會逐漸累積在濾材上，而形成一高濃度的粒子邊界層，當子濃度繼續增加，則所形成的濃度梯度，會使得粒子逆擴散回到主流中，根據這個模式，在穩定狀態下，垂直濾面方向由過濾壓差引起的粒子拉曳力會相等於此方向的布朗擴散，而形成一動態平衡。延用這個模式，大部分的研究都配合薄膜理論，但是也都存在著三個重要的假設：

- （1） 濾材表面的濃度固定。
- （2） 剪應力與泥漿濃度不隨著過濾長度而變。
- （3） 擴散係數為常數。

早期的研究其擴散係數採用布朗擴散係數，而所

預測的穩定濾速會比實驗值低 1-2 個數量級。Porter (1972) 以紅血球進行掃流過濾之研究，認為這是由於 tubular pinch effect 所致，並且此差異被 Green 與 Belfort (1980) 稱為 "flux paradox"。

Zydney 與 Colton (1986) 的研究採用濃度極化模式與薄膜理論，其理論假設為：

(a) 粒子邊界層中具線性速度分佈，故黏度與作用於濾材上之剪應力為常數。

(b) 濃度分佈不隨過濾面長度而變。並認為粒子的逆擴散是由剪應變 (shear induced) 所引起的，當其引入 Eckstein 等人 (1977) 由實驗求得的擴散係數，則除了一些特定的情況外，已經可以和實驗數據有不錯的吻合。但是根據其理論的推導，濃度邊界層的厚度只和粒子之粒徑與過濾長度有關，而和剪應力之大小無關。

Schulz 與 Ripperger (1989) 也同時採用薄膜理論與流體力學的逆輸送模式來說明濃度極化現象。在應用薄膜理論時，粒子的擴散係數仍然採用

Stokes-Einstein 的理論式。其研究指出：因為濃度邊界層的厚度僅與粒子之粒徑相近，所以不會有因為濃度差引起的逆擴散，粒子之逆擴散應該完全是流體力學因素。但是其模式仍必須調整數個參數。

Davis 與 Leighton (1987) 推導一理論來描述在掃流微過濾之層流條件下，沿著多孔壁之濃度邊界層中粒子的傳送情形。在穩定狀態下，因剪力 (shear-induced) 擴散而離開濾面的粒子數和對流到達濾面的粒子數達平衡。其研究並利用此模式來預測邊界層中濃度與非線性速度分佈。

上述 Zydney 與 Colton (1986) 及 Davis 與 Leighton (1987) 的研究中，所分離的粒子都較大 ($>2\mu\text{m}$)，所以慣性現象較為重要，但是對於次微米級粒子而言，慣性力較小，所以可忽略，而粒子的電化學性質對分離效率就具有舉足輕重的影響。Anderson 與 Reed (1976) 及 Anderson 等人 (1978) 即證實粒子的擴散會隨著濃度增加或電荷強度減小而增加。

Davis 與 Sherwood (1990) 以微細粒子在掃流微過濾之穩態濃度極化邊界層，以對流擴散方程式

解得一近似解，其假設為：懸浮液為穩態層流流動、呈全展流分佈和局部之粒子濃度與剪力黏度及剪力擴散係數有關可視為牛頓流體（Newtonian Fluid）。並利用粒子附著在濾面之停滯層來控制過濾阻力，同時也可預測穩定濾速。

II. 過濾阻塞模式

在微過濾程序中，根據粒子堆積在濾材上或阻塞孔道內，造成濾速衰減的不同現象，Hermans 與 Bredee(1936)提出四種粒子阻塞模式，以一指數型之過濾方程式巨觀地關聯濾速與時間的關係，簡單模式敘述包含如下：

(1) 完全阻塞模式 (Complete Blocking Model)

泥漿中粒子粒徑大於濾材孔裡，粒子會附著在濾材面上而會完全阻塞孔道，使得過濾的孔道數變小，而造成濾液減少。

(2) 中間阻塞模式 (Intermediate Blocking Model)

當泥漿中粒子的濃度較完全阻塞模式高時，其阻塞機構與完全阻塞模式相似，但是因粒子量較多，故

除了阻塞孔口之外，還可能在另一粒子層上堆積。

(3) 標準阻塞模式 (Standard Blocking Model)

泥漿中粒子粒徑小於濾材孔裡，粒子會部分附著於濾材表面，而部份隨著濾液進入濾材被吸附於孔道內壁上，使得濾材孔道變小，因此會增加過濾阻力。

以上四種機構，Hermia(1982)以理論延導得以一通式來表示濾液體積與過濾的時間關係如下：

其中 t 為過濾時間， V 為過濾之濾液體積， K_b 視不同機構各有其表示法， n 為不堵塞機構的指標。對於上述四種機構而言，當 $n=2$ 時，表示完全阻塞， $n=1.5$ 時為標準阻塞， $n=1$ 則為中間阻塞， $n=0$ 則為濾餅過濾。

de Bulmann 等人(1990)更進一步考慮薄膜孔徑和粒徑分佈對濾速衰減的影響，當粒子掉落於孔道中，認為有下列三種存在之可能性：

- (1) 孔道遠小於粒徑時，粒子不會進入孔道中，所以通過孔道之濾速通量可等於純溶劑之濾速通量。

(2) 孔道足夠大時，而捕捉吸取力不致讓粒子保

留，但這時通過孔道之濾速通量仍會降低。

(3) 孔道足夠大時，而捕捉吸取力會讓粒子保留而

造成孔道阻塞。

過去的研究大多將薄膜孔道視為圓柱狀，Davies 與 Jia(1995)模擬粒狀多孔性薄膜的結構，並以不同尺寸的粒子，來探討濾餅過濾、內部結垢及轉換階段三種顯著狀況。

Kawakatsu 等人(1995)以模擬的方式探討微過濾中之濾材阻塞，他們假設濾材結構為球形顆粒之六方最密堆積，再以機率產生具布朗運動之微粒子，以粒子濃度為參數來探討由薄膜孔道的阻塞轉變至濾餅過濾的過程。

從過去對於粒子阻塞的研究，在次微米粒徑範圍之粒子，其粒子與粒子或粒子與濾材之間的交互作用力影響過濾效率甚大，可以由粒子堆積情形及阻塞現象之微觀情形，得到如平均孔隙度、平均過濾比阻及濾速的變化。

III. 流體力學模式

力平衡模式係利用流體力學平衡的觀點，先解得泥漿之速度分佈，分析作用於粒子上之作用力，在進而探討過濾中粒子運動的情形。

Altena 與 Belfort(1984)由運動方程式求得兩平板間的流體的速度分佈，然後可由過濾方向之過濾拉曳力和粒子偏移浮力之力平衡分析求得粒子的運動軌跡，再利用並根據 Ho 與 Leal(1974)的機率理論求得濾器內的濃度分佈。

Lu 與 Ju(1989)分析單一粒子接觸於薄膜表面上之受力情形，除了考慮水平和垂直方向之拉曳力外，尚有偏移浮昇力和粒子之淨重力，並衍導出一臨界附著粒徑的估算理論式。

de Bulmann 等人 (1990) 所提出之力平衡模式包含了濃度的影響，他們認為當粒子掉落至孔隙中若吸取力 (suction force) 很強，則粒子會停留於適當的位置。不然，粒子將會重新被釋放回流體中。所以，粒子之重現機率與進料中粒子濃度有關，而孔道阻塞

時間分率也和粒子濃度呈比例關係。

Blake 等人 (1992) 則採用粒子在濾餅表面上之摩擦力平衡模式來探討濾材，掃流速度、過濾壓差、粒徑與 pH 值對濾速的影響。並假設停留在濾面上的粒子正向（濾速方向）淨力和軸向（掃流方向）淨力的比值若大於靜摩擦係數時，粒子將會在濾面穩定附著，不然粒子將會被掃走。同時也發現，微粒子間作用力是不可忽視的。

Schmitz 等人 (1993) 則以理論模式來描述在濾材附近粒子之運動軌跡，並配合統計學方法來產生粒子聚集，以探討粒子聚集結構。並且應用實驗之流體力學條件及分子間之作用力而提出一些模式參數，並分析這些參數對堆積結構的影響。此模式之限定條件為：

- (1) 具完全均勻孔隙之平滑薄膜
- (2) 剛性球形粒子
- (3) 低懸浮液濃度
- (4) 固定之流體狀態。

但是此模式必須調整參數，才能得到不同的聚集結構形態。

Stamatakis 與 Tien (1993) 則以粒子之黏著或然率來描述粒子在掃流過濾器中的運動，進而推衍出一簡單掃流過濾模式。

McDonogh (1989) 等人假設濾餅中粒子的堆積為四面體，且以電雙層理論估計粒子間之交互作用，藉以探討電荷效應對掃流微過濾的影響。他們對於粒徑為 $0.01\sim0.2\ \mu\text{m}$ 之膠體粒子之掃流過濾，利用修正之薄膜理預估其濾速值。其理論在作粒子之力平衡解析時，除了流體力學作用力與布朗運動外，更加入了一靜電作用力（包括了電雙層斥力與凡得瓦吸引力），使得濾速估計值較以往的理论來的準確亦證實了次微粒子的界達電位（Zeta potential）對其分離效率確有決定性的影響。

Jiao 與 Sharma (1994) 探討膠體懸浮液之濾餅成長機構，以冪次流體模式來預測濾餅表面的濾液與剪切力之間的關係。其結論指出：在不同的掃流速度下，改變懸浮液表面性質（如添加絮凝劑、分散劑等），

會影響濾速衰減大小。另外，低掃流速度下，濾餅生長機構呈非均勻堆積。高掃流速下過濾初期，大顆粒被掃走僅微細顆粒會附著於薄膜表面，使得濾餅孔隙度變小，滲透率降低，於達穩態濾速時濾餅會停止生長。

Hwang (1995) 等人係以流體力學和粒子間作用力之動量平衡模式，來分析粒子在濾面上之受力情形，並利用此數學模式來預測聚苯乙烯懸浮液在不同壁剪應力、粒徑、薄膜孔徑與電解質濃度對濾速的影響。結果得知：虛擬穩態 (quasi-steady state) 濾速隨著壁剪應力、粒徑和薄膜孔徑之增加而增加，但卻隨電解質濃度之增加而減少，另外數學模式對非穩定濾速之預測值與實驗值非常吻合。

Elimelech 與 Song (1995) 研究在平板式濾器內粒子附著於濾面的情形，則以對流擴散方程式解析粒子在濾面上的傳輸現象，除了流體力學作用力與慣性浮昇力之外，也加入電雙層作用力（包含有凡得瓦吸引力及電雙層斥力）。他們認為粒子附著率與粒子有關，微小粒徑慣性浮昇力可忽略，電雙層作用力和濾

速拉曳力則變得非常重要，在較大濾速時，粒子完全受濾速拉曳力所控制，而在低濾速，則擴散係數和電雙層斥力扮演著重要角色。由此可知濾速影響粒子之附著和附著結構。

Lu 與 Hwang (1993) 的研究中，已將粒子堆積觀念應用於過濾過程中，從微觀的觀點去了解濾餅的成長機構，同時利用壓縮方程式去探討濾餅的壓縮現象。但是其研究僅適用於較大粒子，亦即皆由 rain model 來堆積粒子，並未考慮粒子的布朗運動。

Lu 等人 (1995) 則將此方法延伸至次微米粒子之濾餅過濾，首先在粒子由泥漿運動至濾面上的過程中，考慮布朗運動的影響，利用 BD 方法求出粒子的運動軌跡，然後使用臨界接觸角的觀念探討粒子在濾面上的附著機構。並以粒子之受力解析分析濾餅的壓縮作用，估計濾餅之局部性質隨時間之變化情形。

在掃流過濾系統中，粒子從泥漿中運動到達濾膜表面附著，進而累積而生成濾餅，流體流經濾餅之流態多為低雷諾數層流流動，粒子從泥漿中運動到達濾面後，為了瞭解粒子如何受到力的作用，我們藉由粒

子之受力解析來判斷粒子之穩定性，採用Lu與Hwang（1993，1995）之粒子臨界摩擦角度概念，來探討粒子在濾面上的附著機構，並且利用作用力平衡分析中粒子恰可穩定附著於濾面上的臨界摩擦角度（ β_c ），來判斷粒子到達濾面時是否會穩定地附著於所接觸表面上或是滾落至最穩定位置上附著。不同表面形態之高分子薄膜，流體流過薄膜表面之流場不同，其粒子能夠穩定附著之機構也不同，另外目前探討不同操作條件對於粒子附著的影響，粒子如何在表面附著的不同現象。

2-3 薄膜表面形態之研究

對某些結構複雜之薄膜而言，將其形態定量化在模擬或數學上並不容易。本研究擬配合統計與機率方法設法克服，高分子薄膜之形態有類球形之連結、節點-纖維連結、圓洞孔道、不規則形態等，每一種形態之薄膜對粒子之截取效率、液體滲透率、阻塞容易度等皆不同。

在定義高分子薄膜之形態的研究上，Wu 與 Wu

(1995) 由電子顯微鏡的影像分析結果定義了薄膜形態的定量參數，例如：幾何孔徑分佈、有效孔徑分佈、孔道形狀之非圓形度 (noncircularity)、表面孔隙度以及薄膜孔道的 fractal dimension 等，並藉由 fractal dimension 來反映出薄膜孔道的不規則程度。

Arnold 與 Davies (1992) 則基於一推測模型 (stochastic model) 來模擬拉伸成形之高分子薄膜結構，並與掃描式電子顯微鏡 (SEM) 的影像做一比較。

Kim 等人 (1994) 曾以熱孔隙儀 (thermoporometry)、雙液滲透孔隙儀 (bilibiquid permporometry) 及分子量截取 (molecular weight cutoff; MWCO) 實驗來定義商業化薄膜的特性，其結果顯示：以熱孔隙儀及雙液滲透孔隙儀所獲得的薄膜孔徑皆比以 MWCO 法來得大，反而電子顯微鏡與 MWCO 法所定義之薄膜孔徑較為接近，由此結果可知，真正控制過濾效率的是薄膜的表面結構。

Elimelech 等人 (1997) 以 SEM 及 AFM 的影像映證了薄膜表面天生之粗糙度，是薄膜表面結垢 (fouling)

速率之決定性因素，薄膜表面越粗糙，結垢速率越快。

Zydney 等人（1999）研究得到薄膜上蛋白質的結垢與薄膜表面形態及孔洞結構有關，以 SEM 觀察薄膜表面之孔隙度，並與實驗之結果作比較。

第三章、理論

粒子在濾面上之附著機構

3-1 粒子附著之臨界摩擦角度

在掃流過濾系統中，粒子從泥漿中運動到達濾面而生成濾餅，如Fig. 3-1所示。其中濾餅表面的兩個粒子，粒子B表示在濾餅表面上已經穩定附著，粒子A則表示剛被輸送到濾餅表面，此二粒子之重心連線與水平線之夾角 β 即稱之為摩擦角度；當接觸角度較大時，表示粒子間摩擦力，小粒子很容易被掃走，而重新回到主流中。

所以，為了更深入了解粒子從泥漿中運動到達濾面後，並藉由粒子之受力解析來判斷粒子之穩定性，則採用 Lu 與 Hwang (1993, 1995) 之粒子臨界摩擦角度概念，來探討粒子在濾面上的附著機構。並利用力平衡分析中粒子恰可穩定附著於濾面上的臨界摩擦角度，來予以判斷粒子到達濾面是否會穩定地附著於所接觸餅表面上或是滾落至最穩定位置附著。

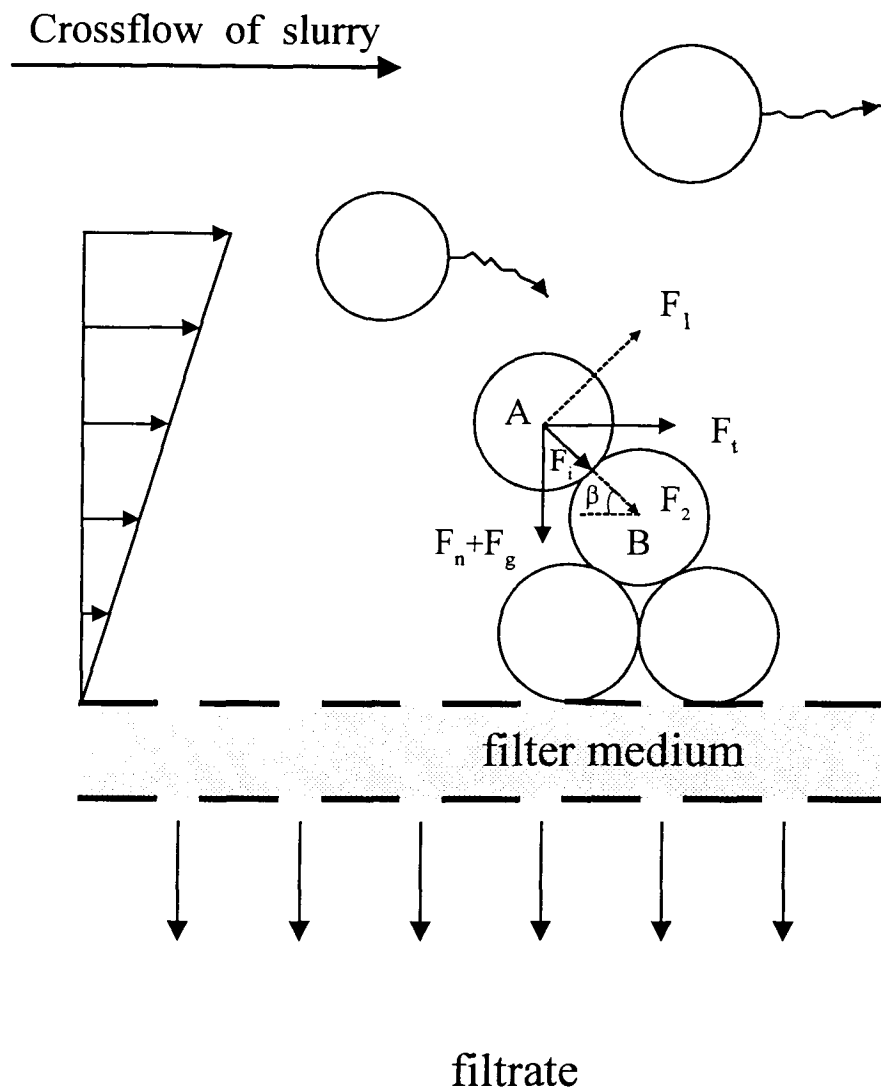


Fig.3-1 Force exerted on the particle which staying on the cake surface.

經由粒子之受力分析可以得知，粒子A所受到的力可分為：粒子間的作用力 F_i ；濾液流經粒子的拉曳力 F_n ；粒子本身的淨重力 F_g ；掃流方向之剪切力 F_t ；以即粒子所受之慣性浮昇力 F_l 。

再經由力平衡分析可以得知：在粒子A恰可以穩定附著的臨界狀態，其各作用力之平衡關係可以寫成：

$$\begin{aligned} & (F_n + F_g)\cos\beta_c - F_t\sin\beta_c \\ & = f_c[F_i + (F_n + F_g)\sin\beta_c + F_t\cos\beta_c] \end{aligned} \quad (3-1)$$

其中， f_c 為粒子間之靜摩擦係數， β_c 為臨界摩擦角度。

在掃流過濾中，流體流經濾餅之流態多為低雷諾數層流流動，而流體之運動方程式及邊界層條件視為線性。為了求解濾面上粒子附著之臨界摩擦角度，必須先就(3-1)式中各項作用力分別進行解析。

(1) 垂直方向之淨拉曳力； F_n

直接引用Lu與Hwang(1993)以反射法之解析結果得知為：

$$\begin{aligned}
\frac{F_n}{6\pi\mu a u_a} = & \cos\beta_c \bar{i} \left\{ 1 - \frac{3a}{2(a+b)} \left[1 - \left(\frac{2}{3} R_m b \right)^{0.5} \right] \right. \\
& + \left. \frac{9}{8} \left(\frac{a}{b + [(a+b)\cos\beta_c - a]} \right) \right\} \\
& + \sin\beta_c \bar{k} \left\{ 1 - \frac{3b}{4(a+b)} \left[1 - \left(\frac{2}{3} R_m b \right)^{0.5} \right] \right. \\
& + \left. \frac{9}{8} \left(\frac{a}{b + [(a+b)\cos\beta_c - a]} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{3-2}$$

其中 a 、 b 分別為 A、B 粒子之粒徑， R_m 為多孔濾材之阻力， u_a 是在 A 粒子處，垂直於濾面方向之淨流體速度，亦即

$$u_a = q - v_l \tag{3-3}$$

其中浮昇速度前之負號表示其方向為遠離濾面，與過濾方向相反。

(2) 掃流之剪切力； F_t

直接引用 Lu 與 Hwang(1995) 之結果，其表示式如下：

$$F_t = 6\pi\mu a (v_a - v_{boa} - v_{boa}^c - v_{aoa}^c) \tag{3-4}$$

其中各項說明如下：

(i) v_a 、 v_b

於掃流過濾方向A、B粒子在原流場之流體速

v_a 、 v_b 分別為

$$v_a = 6u_s \left[\left(\frac{y}{H} \right) - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \quad (3-5)$$

其中 $y = b + (a+b)\sin\beta$

$$v_b = 6u_s \left[\left(\frac{b}{H} \right) - \left(\frac{b}{H} \right)^2 \right] \quad (3-6)$$

(ii) v_{boa}

根據Lu與Hwang(1993)之解析可估計 v_{boa} 為：

$$\begin{aligned} v_{at} &= v_a \sin\beta & v_{bt} &= v_b \sin\beta \\ v_{an} &= v_a \cos\beta & v_{bn} &= v_b \cos\beta \end{aligned} \quad (3-7)$$

B粒子反射到A粒子之反射速度 v_{boa} 為

$$v_{boa} = v_b \left(\frac{b}{a+b} \right) \left[\frac{3}{2} \cos\beta \vec{i} + \frac{4}{3} \sin\beta \vec{k} \right] \quad (3-8)$$

其中 \vec{i} 與 \vec{k} 分別為平行及垂直二粒子重力連心方向之單位向量。

(iii) v_{aoa}^c

由Goldman等人(1967)之結果可以得知：

$$v_{aoa}^c = -\left(\frac{9}{16}\right)v_a \left(\frac{a}{b + (a+b)\sin\beta} \right) \quad (3-9)$$

(iv) v_{boa}^c

對接觸壁面的B粒子而言，從O'Neill(1968)的研究可知，在掃流方向B粒子所受到的流體拉曳力為：

$$F_{t,B} = -1.7009 (6\pi\mu v_a) \quad (3-10)$$

將上面各式代入(3-4)式中，即可得A粒子在平行濾面方向所受之總拉曳力為：

$$\begin{aligned} F_t = & 36\pi\mu a u_s \left[\left(\frac{y}{H} \right) - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \\ & \times \cos\beta_c \vec{i} \left\{ 6u_s \left[\left(\frac{b}{H} \right) - \left(\frac{b}{H} \right)^2 \right] (0.7009) \frac{3a}{2(a+b)} \right. \\ & + \left. \frac{9}{16} \left(\frac{a}{b + [(a+b)\cos\beta_c - a]} \right) 6u_s \left[\left(\frac{y}{H} \right) - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \right\} \quad (3-11) \\ & \times \sin\beta_c \vec{k} \left\{ 6u_s \left[\left(\frac{b}{H} \right) - \left(\frac{b}{H} \right)^2 \right] (0.7009) \frac{3a}{2(a+b)} \right. \\ & + \left. \frac{9}{16} \left(\frac{a}{b + [(a+b)\cos\beta_c - a]} \right) 6u_s \left[\left(\frac{y}{H} \right) - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned}$$

(3) 粒子之淨重力； F_g

粒子所受之淨重力應等於粒子本身之重力減去浮力，亦即

$$F_g = \frac{\pi}{6}(\rho_p - \rho)gd_p^3 \quad (3-12)$$

(4) 粒子間之交互作用力； F_i

本研究乃根據傳統的DLVO理論來探討粒子間之作用力。即當兩粒子互相靠近時，粒子間有兩種主要的長距離作用力：凡得瓦力(Van der Waal force)及電雙層作用力(electric double layer interaction)。此時兩粒子間的淨交互作用力為此兩作用力之線性和。

$$F_i = F_v + F_e \quad (3-13)$$

因此只要預知操作條件、粒徑及摩擦係數 f_c ，即可經由簡單的試誤法求得該狀況下，在濾面上粒子之臨界摩擦角度 β_c 。

3-2 粒子之黏著機構

在大部份的次微米粒子之過濾中，粒子間之相互

作用力 F_i 與流體拉曳力 F_d 是相當的。除了在很接近濾餅表面的區域外，粒子間通常是排斥力。而拉曳力的值可能都比粒子間作用力大，或在某一距離時會較粒子間之作用力小，根據這些力大小關係可為下面兩種可能：

(1) 拉曳力遠小於粒子間作用力：

假如粒子所受到的拉曳力遠小於粒子間排斥力的最大值，濾餅中的任兩個粒子將無法直接接觸而會維持在一個平衡的距離。在此情況下，粒子的表面如同包裹了一個潤滑的電雙層，當過濾時形成濾餅，粒子會向濾材方向動，直到一穩定位置為止。

(2) 拉曳力大於粒子間作用力

假如粒子間的摩擦拉曳力超過了粒子間的排斥力的最大值，則粒子會越過能障而產生極大之凡得瓦爾吸引力進而接觸（此時距離為 2 倍的 stern layer）並黏著在一起。

3-3 粒子之結垢模式

在過濾程序中，粒子在薄膜孔道附著及阻塞之模

式，主要是以造成濾速衰減的不同現象，Hermans 與 Bredee(1936)所提出四種粒子阻塞模式。包含以下三種模式：

(1) 完全阻塞模式 (Complete Blocking Model)

泥漿中粒子粒徑大於濾材孔裡，粒子會附著在濾材面上而會完全阻塞孔道，使得過濾的孔道數變小，而造成濾液減少。其數學表示式如下：

$$q = \frac{dv}{d\theta} = q_0(1 - \lambda v/N) \quad (3-14)$$

其中 θ 為過濾時間， v 為濾液體積， q_0 為初始濾速， N 為懸浮液中所有溶質的數目。

(2) 中間阻塞模式 (Intermediate Blocking Model)

當泥漿中粒子的濃度較完全阻塞模式高時，其阻塞機構與完全阻塞模式相似，但是因粒子量較多，故除了阻塞孔口之外，還可能在另一粒子層上堆積。

$$q = \frac{dv}{d\theta} = \eta\theta + \frac{1}{q_0} \quad (3-15)$$

(3) 標準阻塞模式 (Standard Blocking Model)

泥漿中粒子粒徑小於濾材孔裡，粒子會部分附著於

濾材表面，而部份隨著濾液進入濾材被吸附於孔道內壁上，使得濾材孔道變小，因此會增加過濾阻力。

$$q^{1/2} = \left(\frac{d\nu}{d\theta} \right)^{1/2} = q_0^{1/2} \left(1 - \frac{K_s}{2} \nu \right) \quad (3-16)$$

$$K_s = \frac{d_p^3 \lambda}{3NL(1 - \varepsilon_p)r_0^2}$$

其中 d_p 為溶質之直徑， ε_p 為孔洞表面堆積粒子之孔隙度， L 為薄膜之厚度， r_0 為有效孔道半徑。

另外，還有濾餅過濾模式 (Cake Filtration Model)

$$q = \frac{d\nu}{d\theta} = K_c \nu + \frac{1}{q_0} \quad (3-17)$$

$$K_c = \frac{\mu \alpha_{av} \rho s}{p(1 - ms)}$$

其中 μ 為濾液黏度， α_{av} 平均過濾比阻， ρ 為濾液密度， p 為過濾壓力， s 為溶液中溶質之質量分率， m 為濕乾濾餅質量比。

Hermia(1982)以理論延導得以一通式來表示濾液體積與過濾的時間關係如下：

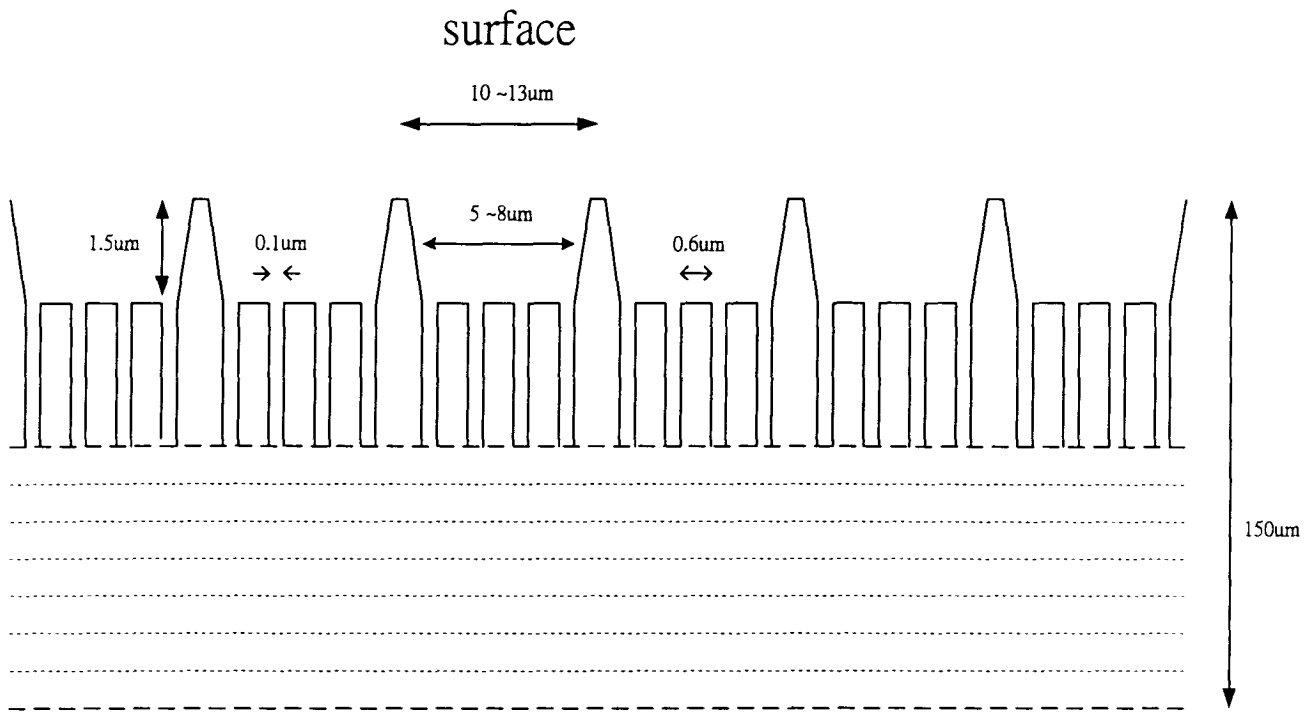
$$\frac{d(d\theta/d\nu)}{d\nu} = \frac{d^2\theta}{d\nu^2} = k \left(\frac{d\theta}{d\nu} \right)^i \quad (3-18)$$

其中 θ 為過濾時間， v 為過濾之濾液體積， k 視不同機構各有其表示法， n 為不堵塞機構的指標。對於上述四種機構而言，當 $n=2$ 時，表示完全阻塞， $n=1.5$ 時為標準阻塞， $n=1$ 則為中間阻塞， $n=0$ 則為濾餅過濾。有關各種模式之 k 及 i 值整理如下表。

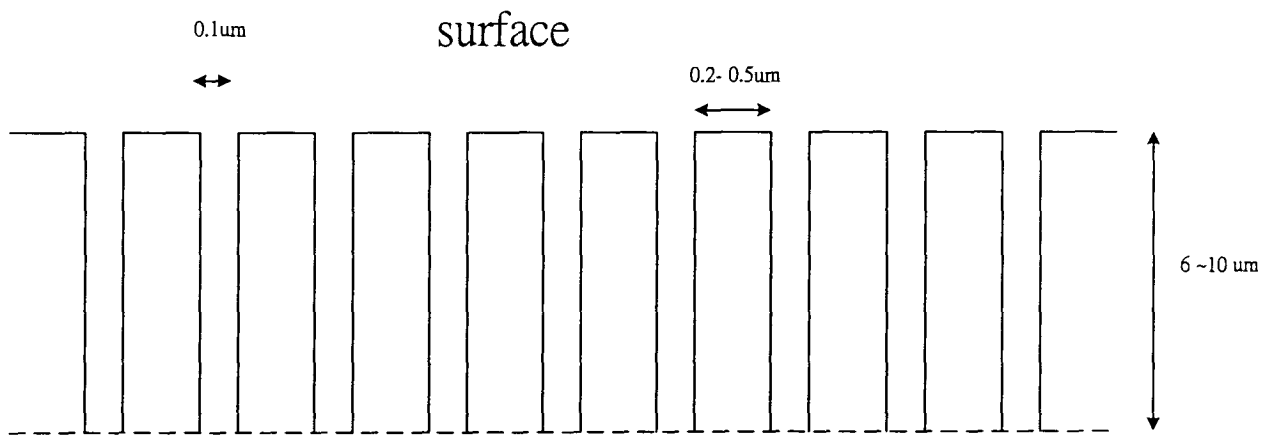
Table 3-1

Model	k	i
Complete blocking	$q_0\lambda/N$	2
Standard blocking	$K_s q_0^{1/2}$	1.5
Intermediate blocking	η	1
Cake filtration	K_c	0

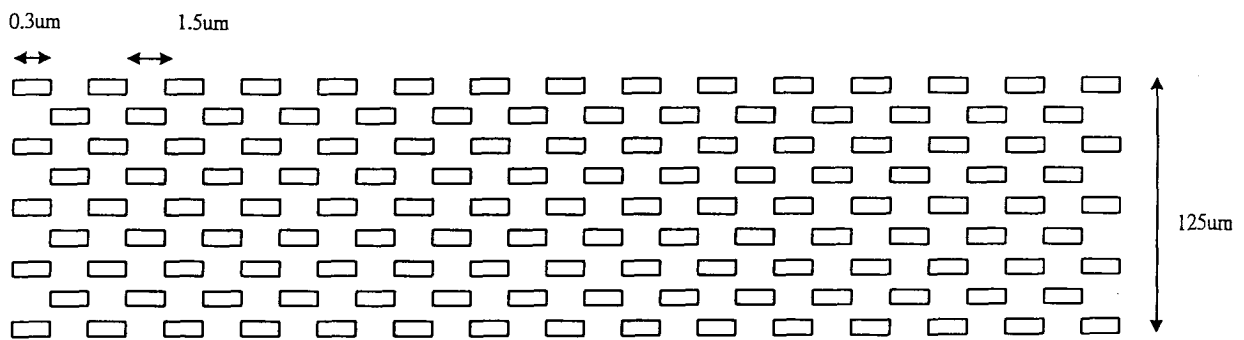
在研究中，我們可以對於薄膜孔洞結構加以描述，Fig. 3-2 為三種薄膜描述所得之模型。在模型中MF 薄膜有開放之外部孔洞，內部之孔洞較為均勻，孔隙分布很廣。Isopore 薄膜具有圓柱狀之孔道，薄膜孔道大小均勻，幾乎都為一致的孔徑。



MF



Isopore



Durapore

Durapore 之孔道結與網狀海綿體相類似，孔隙度也蠻大的。

我們根據這個模型與阻塞結垢之表示圖形加以討論。如 Fig. 3-3 為 Belfort 等人 (1993) 對於結垢研究所描述之結垢模型示意圖。依據粒子與孔洞大小之關係，可以有三種形式，依此可以判別粒子阻塞位置與薄膜孔道之關係。

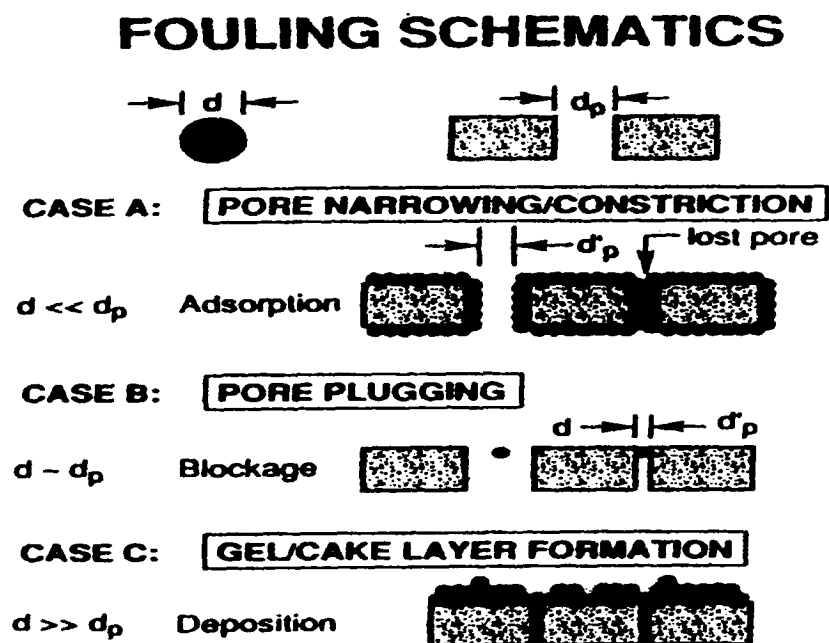


Fig. 3-3 Fouling schematics

第四章、研究方法

本研究主要探討薄膜之形態對掃流微過濾的影響，並進而歸納出各種高分子薄膜之適用時機，並且配合子計劃七及十二之薄膜製備技術，將研究成果應用於各項精密化工程序。

首先對於薄膜表面形態之定義加以說明。我們所說的薄膜表面形態主要可分為薄膜之孔隙分布、表面孔隙度、表面結構、孔道結構等，皆會影響粒子在薄膜表面堆積之情形，進而會影響液體過濾的進行。在一般微過濾程序中，影響其過濾效果的因素有很多，其中最主要的決定性因素為粒子阻塞孔洞以及在薄膜表面的結垢（fouling）。

粒子經流體帶至薄膜表面，由於過濾壓差以及濾液向下之拖曳力而向薄膜表面靠近，堆積在薄膜表面，阻塞了薄膜的孔道，增加了過濾的阻力，阻礙了液體的通過，造成濾液的衰減現象，因此針對高分子薄膜之掃流過濾特性加以實驗。擬採行之研究步驟如下：

1. 以模擬與數學方法定義具代表性的薄膜形態，

亦即將薄膜之形態定量化。擬分析之薄膜形態

有：

- 類球形之連結
- 節點—纖維連結
- 圓洞孔道
- 不規則形態

2. 以流體力學探討濾膜形態對懸浮液流態的影

響。因為在接近濾膜表面處之流體流態會影響

微粒子之運動、附著、吸附或結垢，故需先求

解流體之速度分佈。

3. 以流體力學、介面化學與質量傳送學分析微粒

子與膠體在掃流微過濾器中之運動與輸送。

- 分析微粒子在微過濾器中之受力，並以運動方程式模擬其運動軌跡。
- 分析在掃流微過濾器中之粒子或膠體之濃度分佈。

- 分析在掃流微過濾中之粒子輸送通量。
4. 探討粒子在濾膜表面上之附著機構。
- 分析粒子到達濾膜表面上時之受力情形。
 - 以粒子之受力及力矩分析，探討粒子可以附著的條件。
 - 探討操作條件對粒子附著的影響。
 - 探討濾膜形態對濾餅性質及穩態濾速的影響。
 - 分析微粒子與過濾薄膜間之交互作用。
 - 分析微粒子之吸附或結垢之條件。
5. 探討粒子及膠體在濾膜孔道中之附著或結垢機構。
- 將薄膜之孔道形態定量化。
 - 以流體力學估計粒子或膠體之阻塞機率。
 - 分析微粒子與過濾薄膜之交互作用。
 - 分析微粒子之吸附或結垢之條件。

6. 探討濾膜形態對微粒子及膠體掃流微過濾的

影響。由其微粒子之阻截效率與固液分離效率

歸納出各種高分子薄膜之適用時機。

7. 本研究群之其他子計劃可以合成製作各種材

質與形態之薄膜，藉由本研究之進行，可以充

分了解各種薄膜在精密分離上之應用。

第五章、實驗內容

以不同之掃流速度及過濾壓差進行掃流過濾實驗，觀察其穩態濾速之變化，本實驗以微觀的角度探討高分子薄膜之表面形態，以不同表面形態之薄膜加以實驗，討論其濾速衰減、過濾阻力增加及濾餅孔隙度及性質的變化。

我們以三種不同表面形態之高分子薄膜加以實驗，同樣為 Millipore 之三種相同孔徑之薄膜，分別為 MF、Isopore 與 Durapore，以不同掃流速度及不同過濾壓差進行掃流過濾，可以得到三種高分子薄膜對於不同操作條件下濾速衰減的變化，以及薄膜本身過濾阻力在不同操作條件的變化。

5-1 實驗裝置

掃流微過濾實驗裝置如 Fig.5-1 所示。其中利用循環式恆溫槽，將恆溫後的水連續傳送至可容納約 30 公升之水槽中，以保持實驗中泥漿溶液之溫度恆定。實驗時將配置好的泥漿，先經由超音波振盪器均勻振盪約二十分鐘左右，再由循環泵輸送經由浮子流量計

測量流速後進入掃流過濾器中。過濾之後，濃縮的泥漿被循環送回泥漿槽，而濾液則經由濾液收集瓶予以收集，此濾液收集瓶放置於電子秤上，所以濾液之收集量可經由電子秤直接讀取，或傳送至個人電腦作自動取樣及數據處理。

如Fig. 5-2所示為平板式掃流過濾器之詳細裝置構造圖，採用Millpore Company之Minitan-S Ultrafiltration System，過濾模組由上下二平板以材質為壓克力所組構而成，流體於模組中之流動渠道是以厚度為 $1 \times 10^{-3} \text{m}$ 之矽膠墊片所構成、長度為 $5.7 \times 10^{-2} \text{m}$ 及寬度為 $2 \times 10^{-2} \text{m}$ 之矽膠墊片所構成，實際過濾面積為 $1.14 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。本研究使用之粉體和薄膜之物性詳見附錄，而掃流過濾實驗時，改變之各操作條件如 table 1 所示。

5-2 實驗步驟

1. 將已知重量百分比之聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 粉體懸浮溶液，置於儲槽中，以攪拌器來攪拌泥漿並調節恆溫槽控溫器至所欲操作之溫度。
2. 將浸泡過之過濾薄膜安置於過濾模組中，並裝上壓克力上板，利用特殊力矩栓緊以防止泥漿滲出。
3. 過濾操作之前先以去離子水在薄膜過濾系統中先行運轉，使氣泡完全排出，再開始操作以減少過濾阻力。
4. 待儲槽內溫度恆定後，開啟泵浦電源，將懸浮液輸送至超過濾器中，調節浮子流量計 (A) 和浮子流量計 (B) 上之流量控制閥，用來控制泥漿之掃流速度及過濾壓差。
5. 打開連接濾液收集瓶之活栓，開始進行掃流過濾實驗。同時並利用連線將濾液量經由電子秤傳送至電腦，進行自動取樣及數據處理，而得到濾速對時間之關係。濃縮液則經由浮子流量計 (B) 回流至儲槽。

6. 儲槽中因過濾之濾液額外收集而造成懸浮溶液量逐漸減少，所以過濾期間隨時補充等量之去離子水，以維持懸浮液濃度恆定。
7. 在濾速維持長時間之定值後即可終止實驗，然後關掉控制閥A、B，拆卸裝置。並將濕濾餅小心刮取後稱其重量，再置於烘箱中烘乾，然後再稱乾濾餅重，由濕乾濾餅質量比可估計其孔隙度。
8. 改變不同的操作條件，重複上述之步驟。
9. 處理電腦所記錄的數據並加以分析。

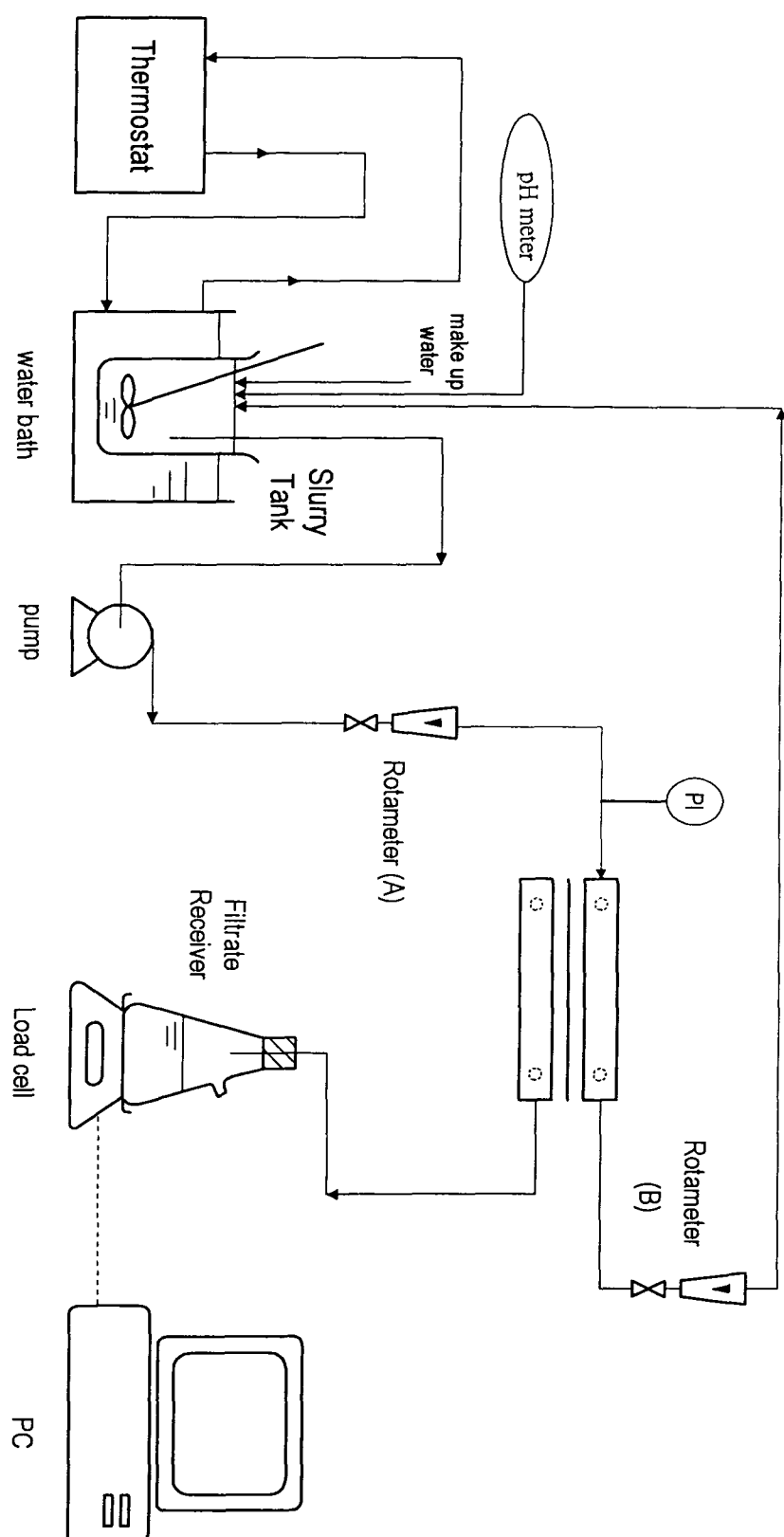


Fig. 5-1 A schematic diagram of crossflow filtration system.

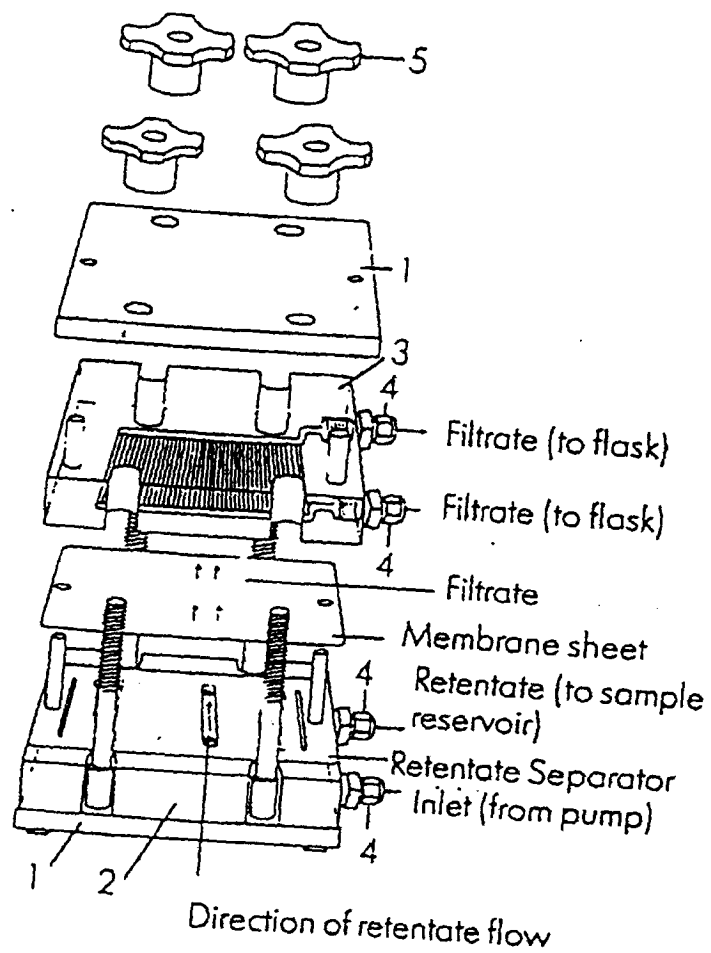


Fig. 5-2 A schematic diagram of the plate filter system

Table 1. The operating conditions used in this study

Particle	PMMA
Particle size (μm)	0.4 ~ 0.25
Membrane Types	MF-Millipore Isopore Durapore
Pore size (μm)	0.1
Crossflow velocity (m/s)	0.15 ~ 0.85
Pressure drop (kPa)	20 ~ 140
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20
Feed conc. (wt %)	0.5
Reynolds number (Re)	350 ~ 850

第六章、實驗結果

為了得到高分子薄膜之表面形態如何影響掃流過濾的結果，我們採用三種不同表面形態之高分子薄膜加以實驗，同樣為Millipore 三種相同孔徑之親水性薄膜，分別為 MF (Mixed cellulose esters)、Isopore (Bisphenol polycarbonate) 與 Durapore (Modified polyvinylidene difluoride) 薄膜，在實驗操作上改變了不同掃流速度、不同過濾壓差及粒子大小之條件進行掃流過濾，以得到三種高分子薄膜對於不同操作條件下濾速的變化，並且我們也可得到不同高分子薄膜對於粒子堆積形成濾餅及生成濾餅孔隙的變化，以及薄膜本身之過濾阻力 (R_m) 在不同操作條件下的變化。

另外，為了瞭解粒子如何在薄膜表面附著及堆積，我們取出過濾後之高分子薄膜，經過液態氮處理後，以 SEM (掃瞄式電子顯微鏡) 觀察拍攝表現真實粒子在不同表面形態之高分子薄膜附著及堆積的情形。

6-1 操作條件與薄膜種類對於濾速的影響

我們採用三種不同表面形態之高分子薄膜進行掃流過濾實驗，由不同操作條件之實驗結果來看，大致上有相同的趨勢，在三種高分子薄膜之中，以 Isopore 之穩定濾速最高，其次是 Durapore，MF 薄膜之穩定濾速最低，其原因與三種薄膜之表面特性有密切的關係。以下針對操作條件及薄膜表面特性對於過濾性質的影響加以分析。

1. 操作壓力之影響

由 Fig.6-1 濾速對時間作圖可以看出，MF 薄膜在固定掃流速度之下，對於改變過濾壓差時濾速衰減的影響。對於在低掃流速度下，其穩態濾速大致隨著過濾壓差增加而變大，但是在低掃流速度時，粒子較容易被帶至薄膜表面而附著，且較無選擇性，粒子會因為過濾壓差之作用而阻塞住薄膜內部孔隙，因此過濾壓差增加到某一範圍時，其穩態濾速會有明顯降低的現象，在300 sec時濾速已衰減為原來之50%，而且過濾壓差越大，薄膜阻塞的效應越大，但是濾速到達

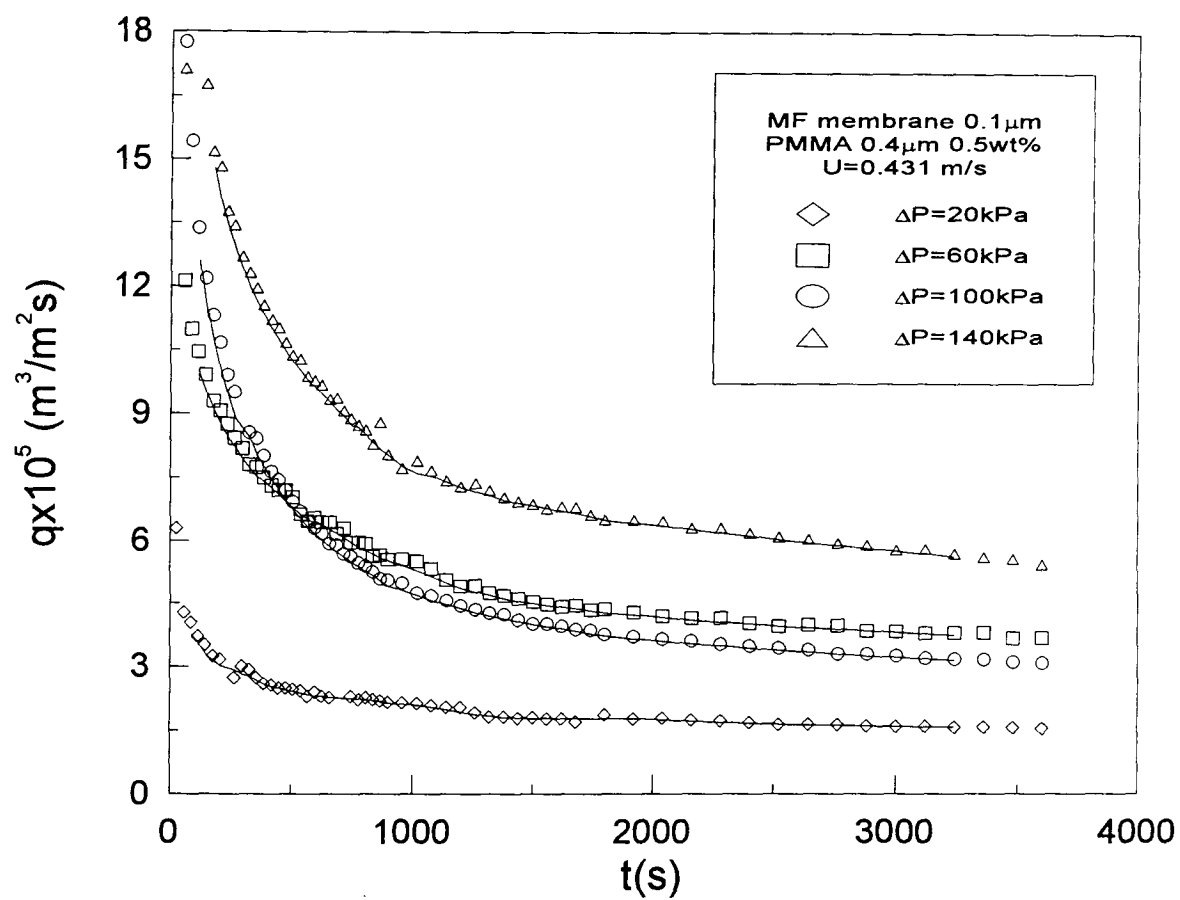


Fig.6-1 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different filtration pressure

穩定的時間卻是越長，其原因與MF薄膜表面形態有關，由於薄膜表面生成濾餅較少，粒子只會繼續阻塞孔洞，濾速才會不斷降低。

我們由 Fig.6-2 及 Fig.6-3 濾速對時間作圖可以分別看到 Durapore 及 Isopore 薄膜在固定掃流速度下，改變過濾壓差對於濾速衰減的影響。由於粒子附著於薄膜之機構不同，粒子堆積於薄膜孔洞之結構也不同，Durapore 薄膜其表面有一表皮層，粒子只能阻塞於表皮層結構之中，當阻塞到一定程度，其表皮層中之孔隙度已達到一穩定值，因此濾速可較 MF 薄膜為高；至於 Isopore 薄膜的粒子附著情形，因為其表面孔隙十分均勻（5% ~ 20% ），遠較於 Durapore 薄膜（70% ）及 MF 薄膜（84% $8\mu\text{m}$ ~ 70% $0.025\mu\text{m}$ ）之表面孔隙分佈來的均勻，所以粒子不能直接將孔洞阻塞住，只能以類似嵌入的方式將孔洞暫時覆蓋住，也就是說粒子較無法穩定的附著於薄膜表面，也因此能夠維持很高的濾速。另外由圖中也可看出，當過濾壓差增加時，雖然其穩定濾速也相對提高，但是阻塞的效應也同時增大，兩種薄膜之濾速在 1500sec

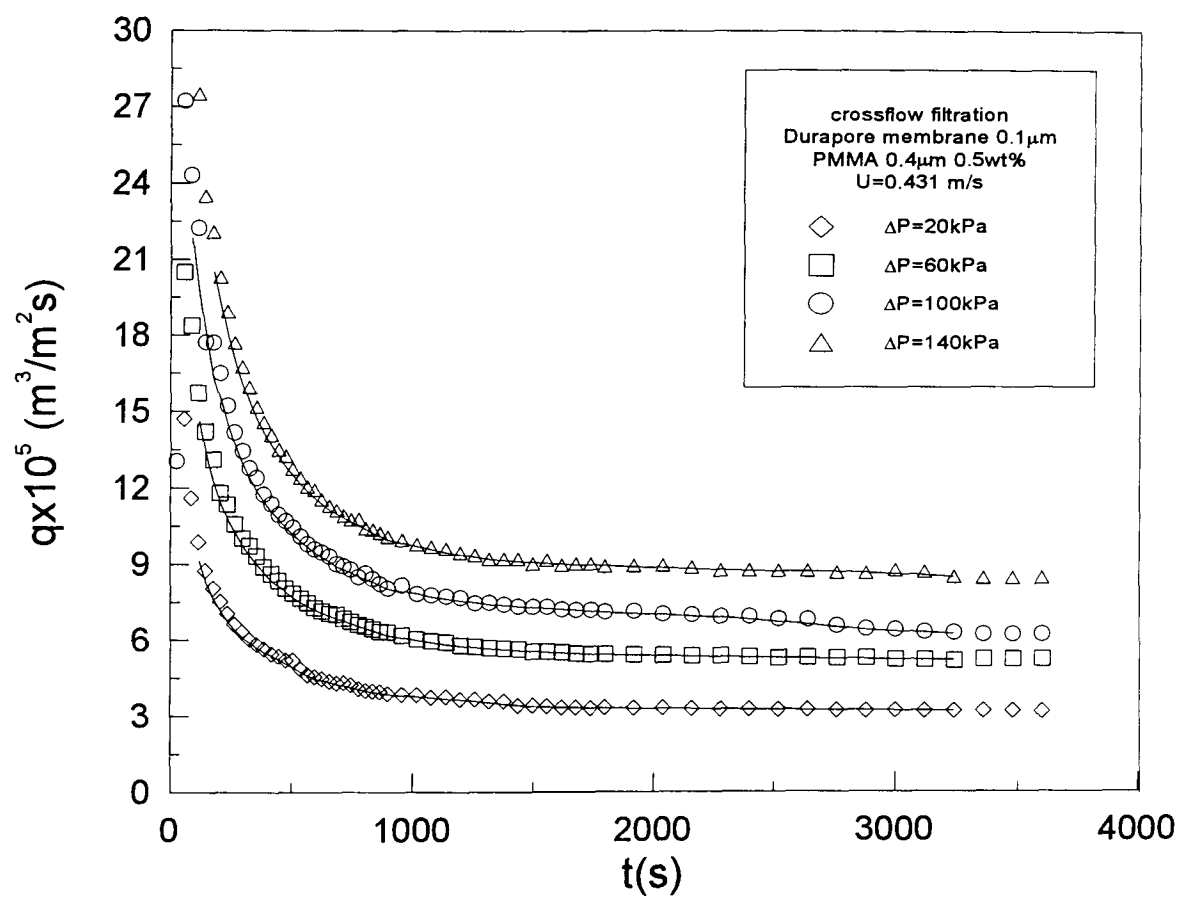


Fig.6-2 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different filtration pressure

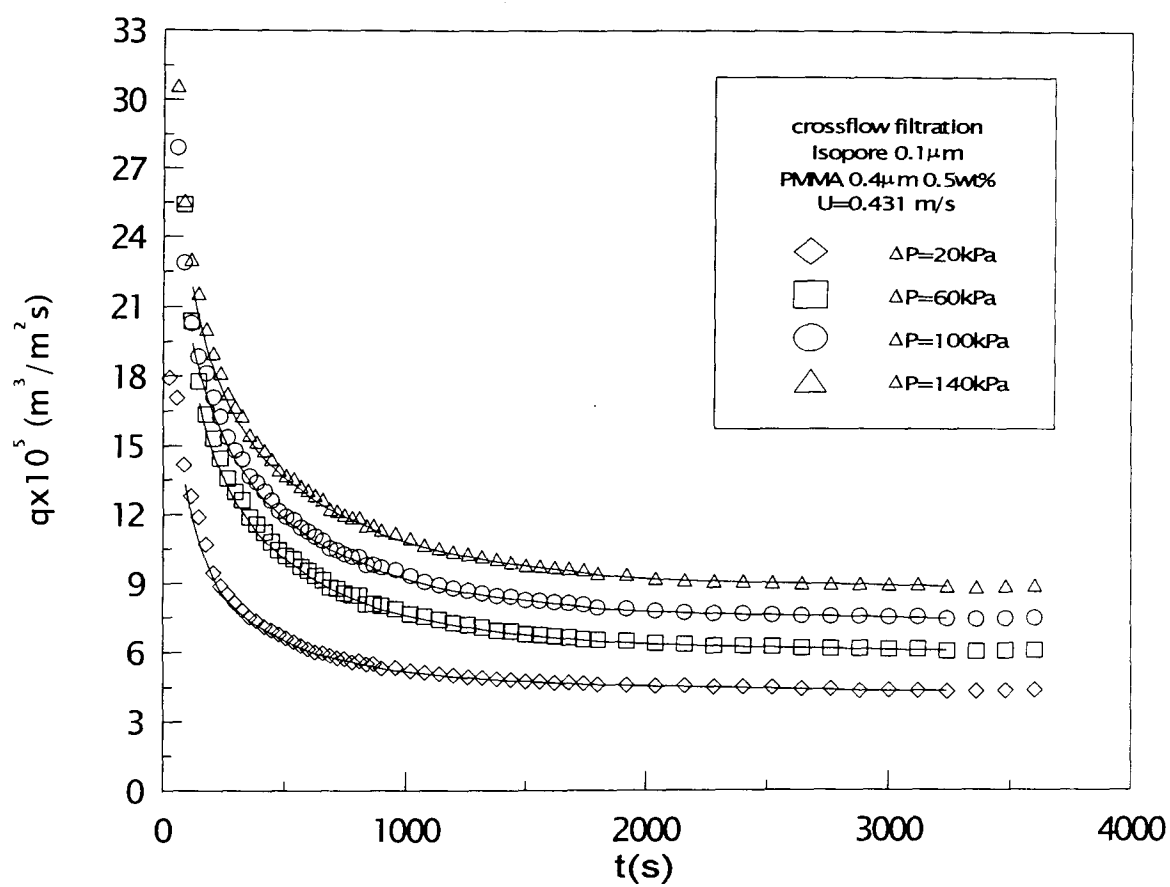


Fig.6-3 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different filtration pressure

已達穩定，表示其生成之濾餅已達平衡。

2. 掃流速度的影響

對於掃流速度之影響如 Fig. 6-4 所示，MF 薄膜在固定過濾壓差之下，對於改變掃流速度時濾速衰減的影響。其穩態濾速大致隨著掃流速度增加而變大，而其過濾初期阻塞的速率隨著掃流速度增加而變慢，而到達穩定濾速之時間也變長了，其原因為粒子不易附著於薄膜表面，阻塞的情形也減少了。

由 Fig. 6-5 固定過濾壓差之下，對於改變掃流速度時濾速衰減的影響之結果相當接近，可以看出改變掃流速度，對於 Durapore 薄膜之濾速並無明顯的影響，差別只在一實驗開始時，粒子阻塞孔洞之效應因為掃流速度增加而減少，但是操作至一定時間，其穩定濾速幾乎相同。

Fig. 6-6 為固定過濾壓差之下，對於改變掃流速度時 Isopore 薄膜濾速衰減的影響。掃流速度愈大時，其穩定濾速會明顯的增加，表示粒子愈難附著於薄膜表面。

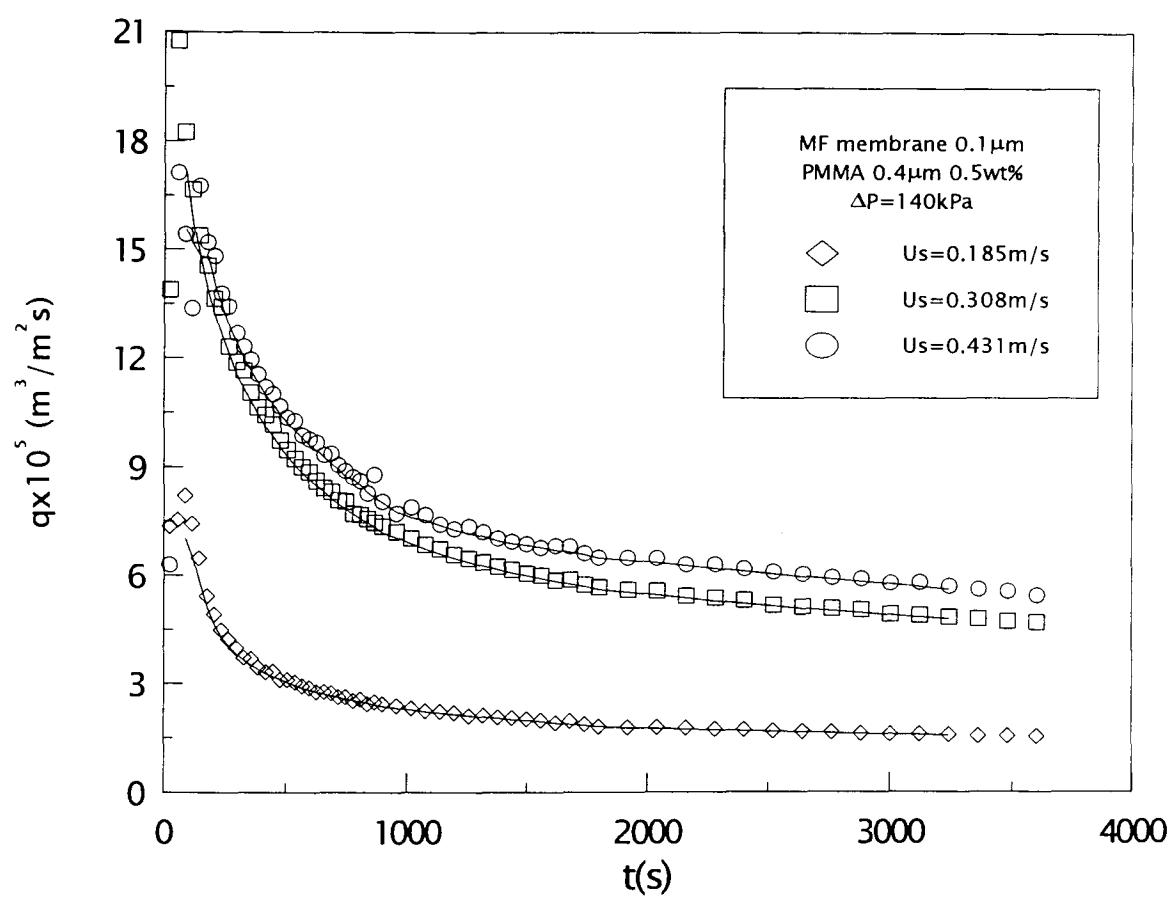


Fig.6-4 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different crossflow velocity

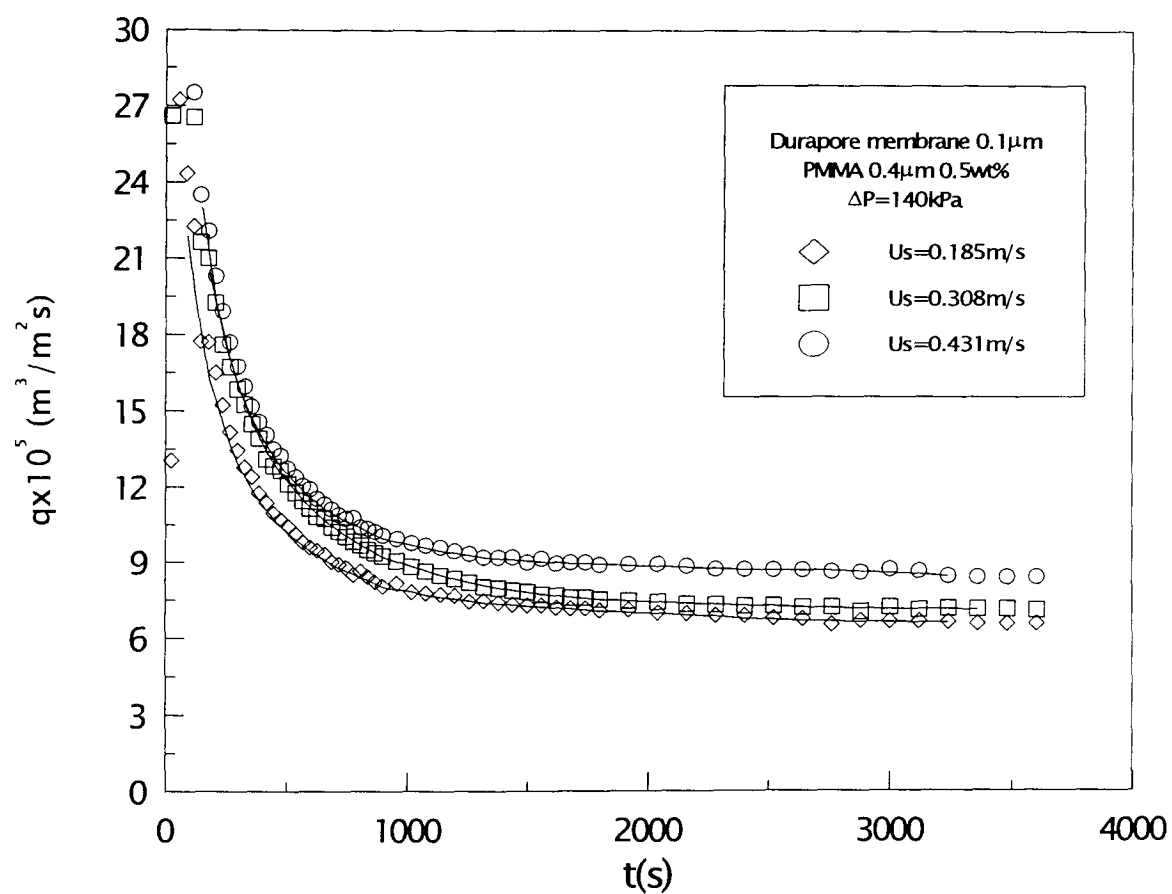


Fig.6-5 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different crossflow velocity

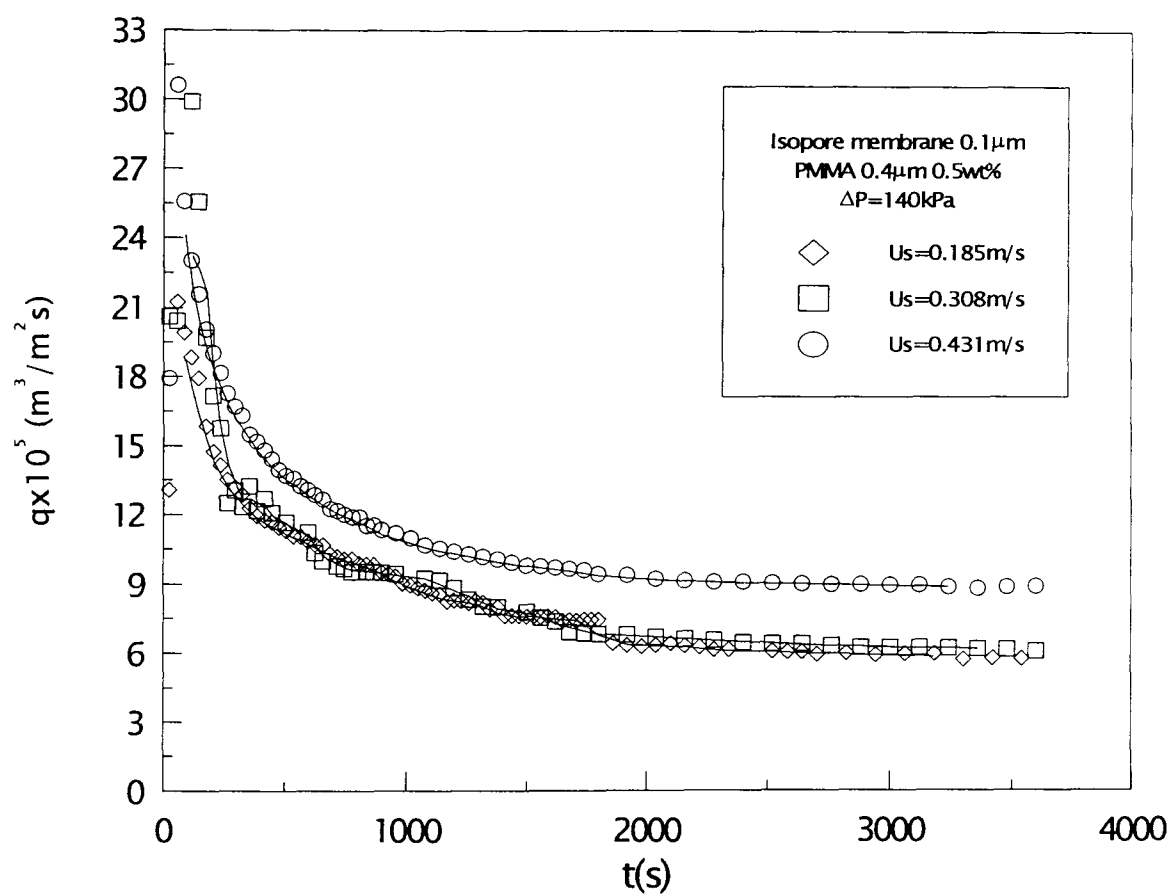


Fig.6-6 Decay of filtration rate during crossflow filtration under different crossflow velocity

3. 薄膜種類的影響

雖然操作條件不同，實驗所得之結果明顯的表示因為薄膜的選用，造成過濾性質的不同，因此影響了過濾的效率。

Fig. 6-7 為三種薄膜在相同操作條件下，其濾速變化之比較。由圖中可以看出三種薄膜之穩定濾速有明顯的差距，其原因為薄膜表面形態差距甚大。MF 薄膜具有大又開放的孔道，粒子較容易進入其孔洞結構中，阻塞的狀況較為嚴重，因此穩定濾速最低；而穩定濾速最高的 Isopore 薄膜表面孔隙均勻，孔道類似一圓柱形，粒子不易進入孔道中，其穩定濾速也就比其他兩種薄膜來的高。

6-2 薄膜阻力的分析

Fig. 6-8~10 為三種薄膜在不同過濾壓差下，薄膜阻力隨時間的變化。由圖中可以看出粒子阻塞孔洞造成過濾阻力增加，當過濾壓差提高時，阻塞的現象越嚴重，因此阻力隨過濾壓差增加而增加。

基於薄膜阻力是由於粒子之阻塞所造成，本研究

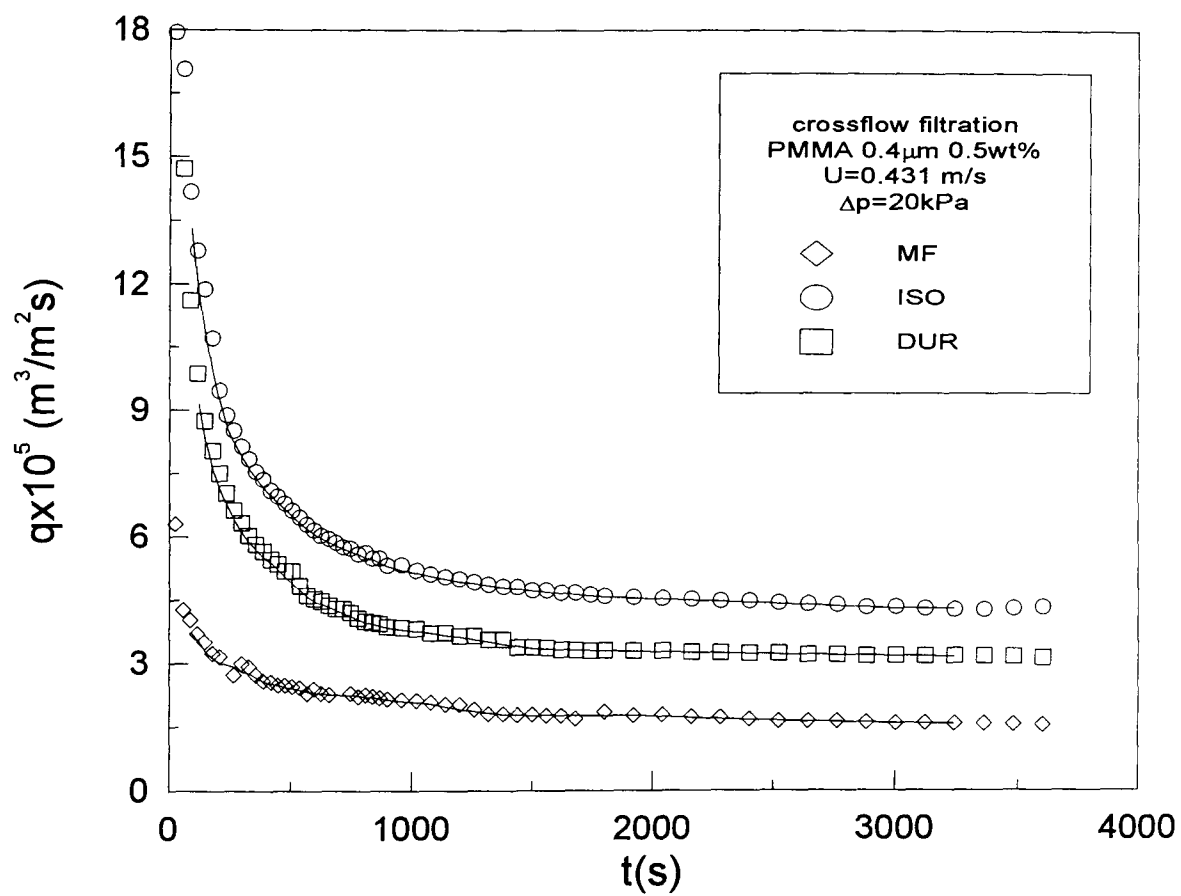


Fig.6-7 Decay of filtration rate during crossflow filtration with different membranes

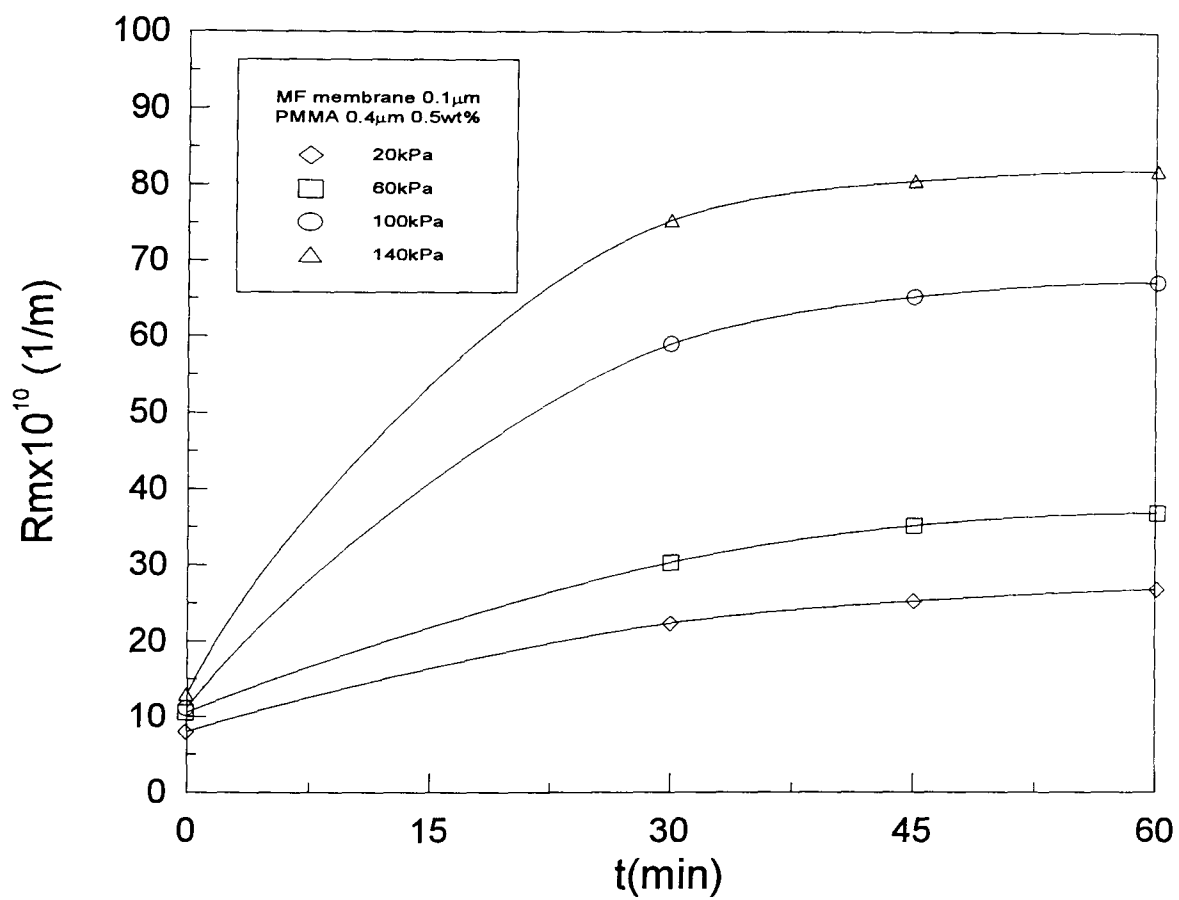


Fig.6-8 Resistance change with time during crossflow filtration under different filtration pressure

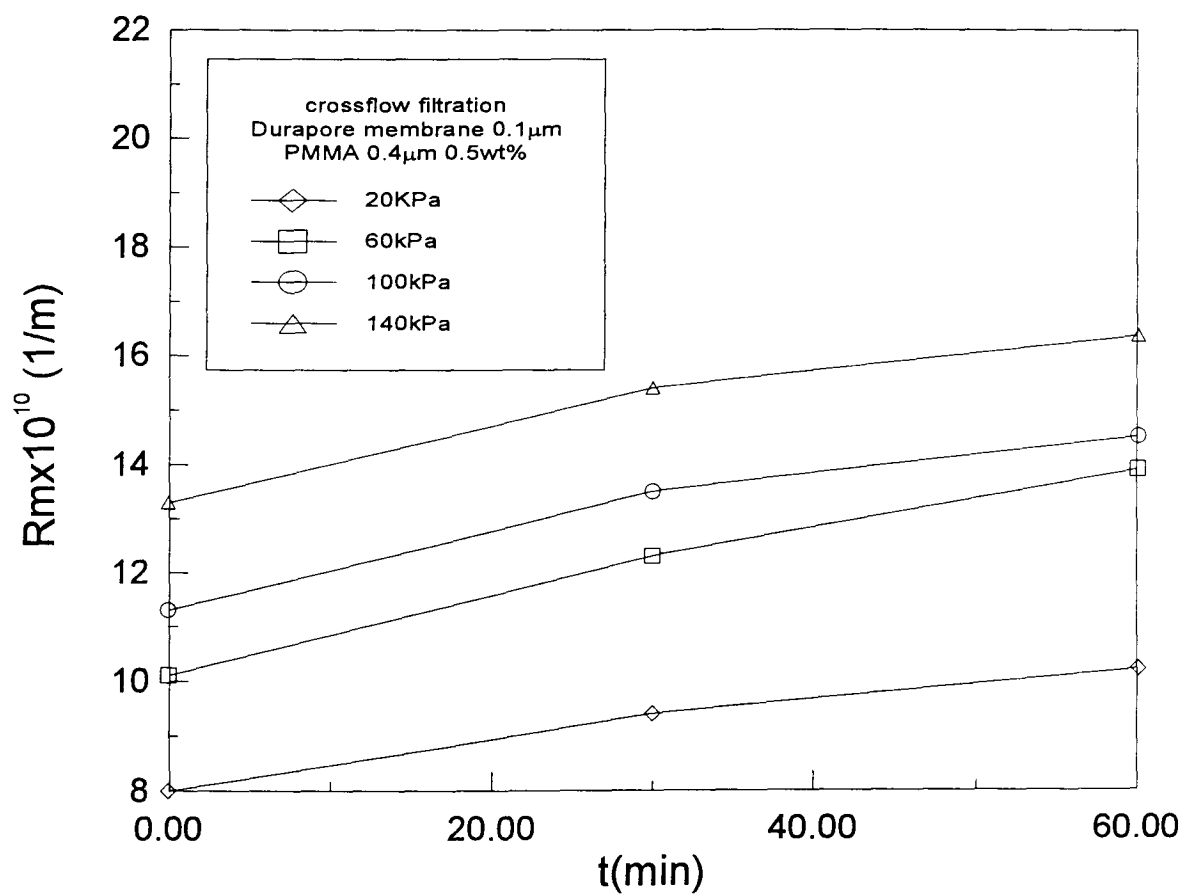


Fig.6-10 Resistance change with time during crossflow filtration under different filtration pressure

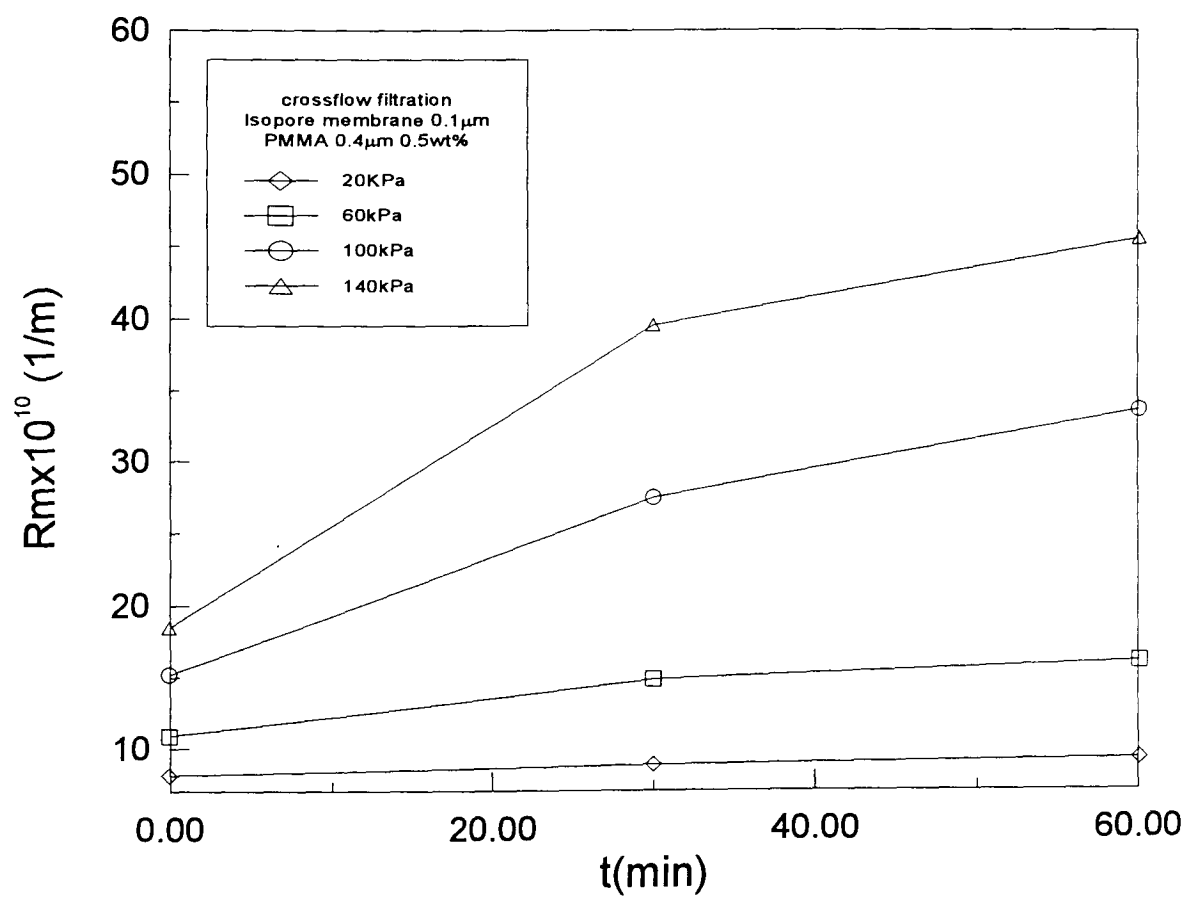


Fig.6-9 Resistance change with time during crossflow filtration under different filtration pressure

針對阻塞模式加以探討，並以恆壓過濾實驗加以映證其不同薄膜之阻塞機構。主要是以造成濾速衰減的不同現象，Hermans 與 Bredee(1936)所提出四種粒子阻塞模式加以探討，並且與研究中所描述之薄膜孔道模型一起討論。

Fig.6-11 為 MF 薄膜之 (dt/dv) 與 v 之關係圖。

由圖中可以看出一組合之現象，前半段為標準阻塞的現象，而後半段為濾餅過濾現象，分析其原因可以歸因於 MF 薄膜表面具有一些較大的孔洞，粒子會進入附著於孔道壁，縮減了孔道直徑；而後半段為當孔道被阻塞至一定程度時，粒子開始會在薄膜表面累積而形成濾餅，直至濾室完全被粒子所堆滿，濾液量才會急遽的下降。

Fig.6-12 為 Isopore 薄膜之 (dt/dv) 與 v 之關係圖。由實驗的結果加以分析，粒子無法進入孔道中，而是以直接覆蓋孔洞的形式，可以將其結果以完全阻塞模式加以映證。

Fig.6-13 為 Durapore 薄膜之 (dt/dv) 與 v 之關

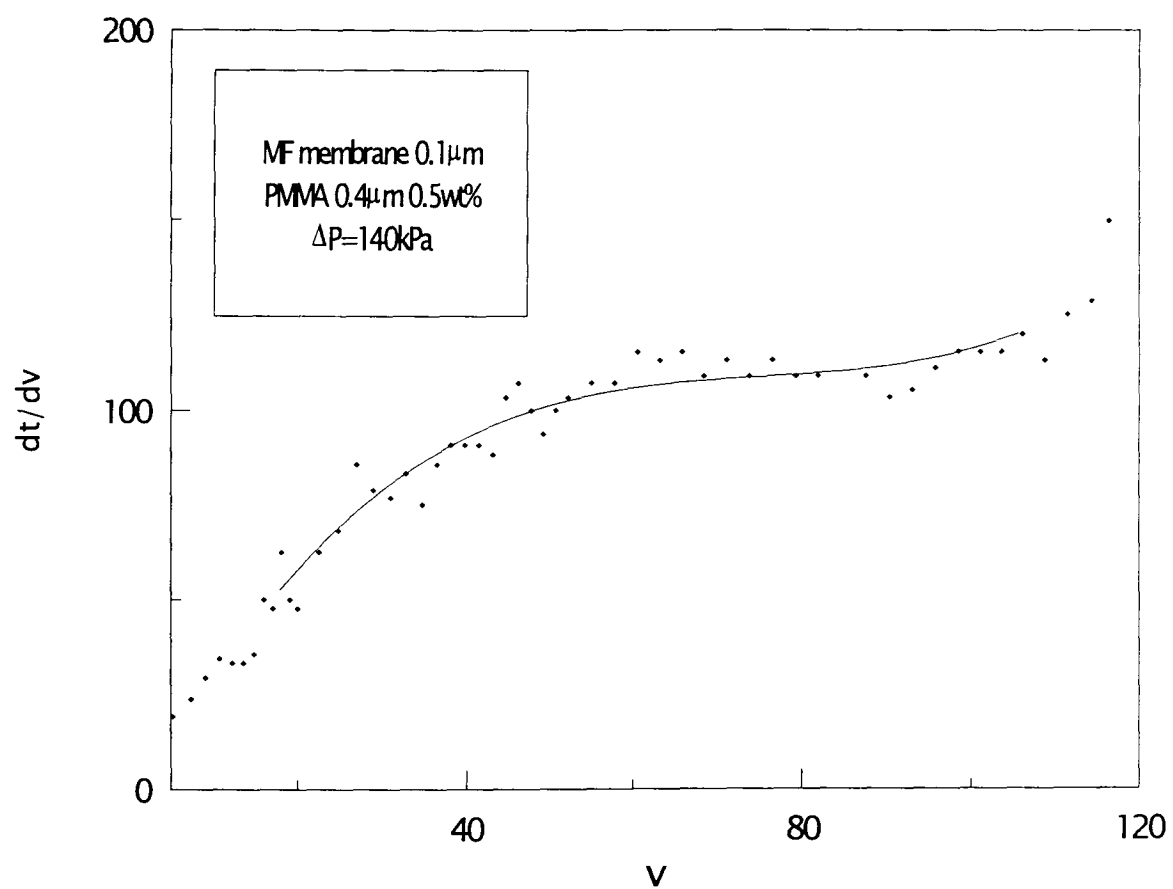


Fig.6-11 dt/dv vs. v during deadend filtration

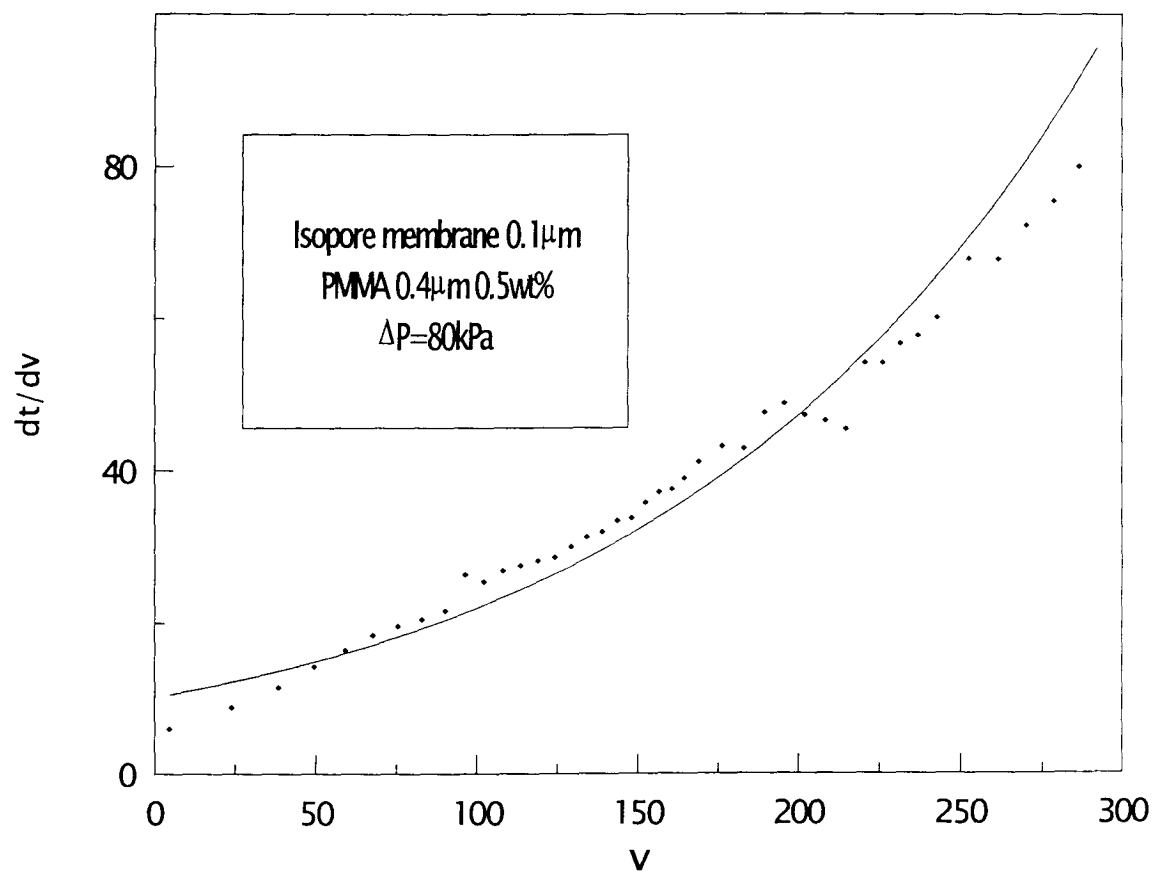


Fig.6-12 dt/dv vs. v during deadend filtration

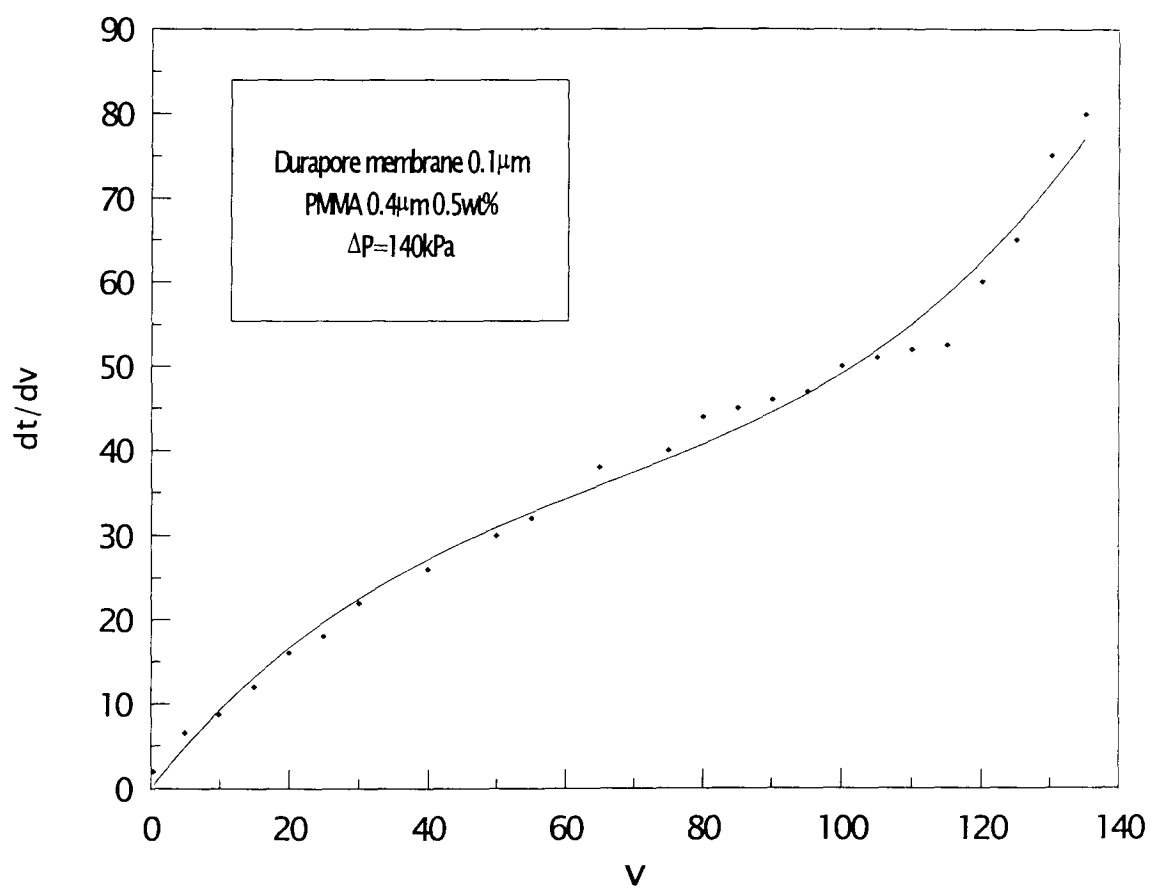


Fig.6-13 dt/dv vs. v during deadend filtration

係圖。其結果與 MF 薄膜十分相似，只是中間的轉折變化不太明顯，也是由於其表面之孔洞並不大，粒子進入薄膜之表層後即被擋住，所以粒子幾乎都是堆積在薄膜之表層，由其過薄膜濾阻力變化不大即可看出。

我們取出過濾後之高分子薄膜，經過液態氮處理後，以 SEM（掃描式電子顯微鏡）觀察拍攝表現真實粒子在不同表面形態之高分子薄膜附著及堆積的情形。Fig. 6-14~16 為三種薄膜上粒子堆積之情形。

我們可以發現 MF 薄膜之表面孔隙分佈很廣，粒子可以附著於孔洞的內壁，因此阻塞的情形十分嚴重，濾液也較無法通過。而 Durapore 薄膜表面具有一表皮層，粒子也就被阻擋在外，薄膜阻力也就不會增加的很大。Isopore 表面無高低起伏之孔洞結構，粒子只能在其表面附著，而且可以看到粒子排列的情況，粒子與薄膜之間並無緊密的結合，因此濾液可容易的通過。

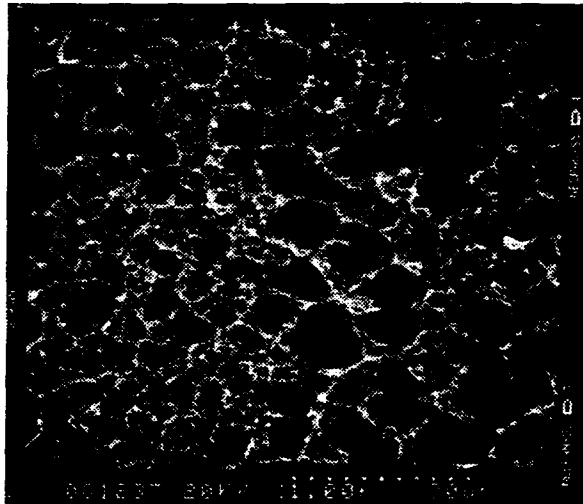


Fig. 6-14 A top view of MF membrane particles deposited
by SEM (x 1,000X)

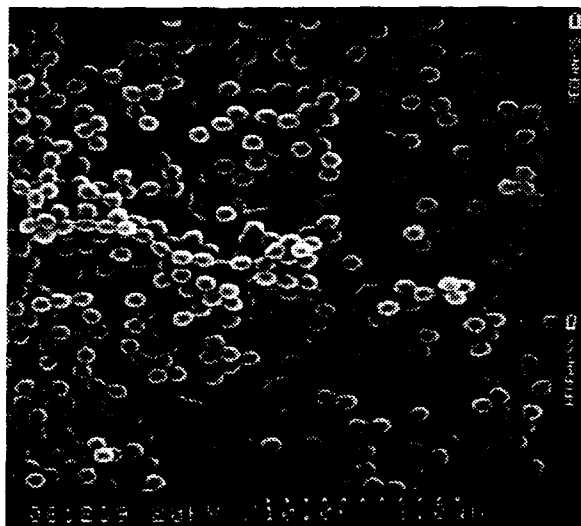


Fig. 6-15 A top view of Durapore membrane particles deposited
by SEM (x 10,000X)

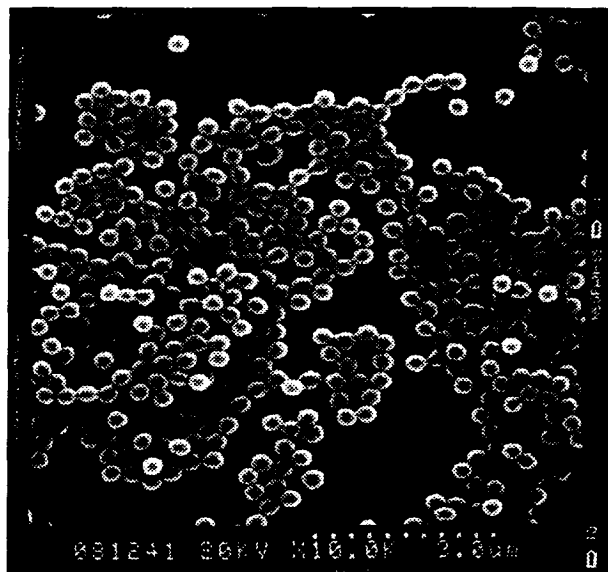


Fig.6-16 A top view of Isopore membrane particles
deposited by SEM (x 10,000X)

第七章、結論

我們採用三種不同表面形態之高分子薄膜加以實驗，再加以改變掃流速度、過濾壓差及粒子大小，對於薄膜表面性質加以深入的探討。我們由目前所得的實驗結果中，可以得到以下的幾點結論：

1. 過濾壓差的影響

在固定掃流速度之下，當過濾壓差遞增時，三種高分子薄膜之濾速雖然也同時增加，但是三種薄膜相對的濾速差距會加大，其原因與薄膜表面形態有極大的關係。MF 薄膜因其有較多、較深且較為開放之表面孔洞，因此粒子較容易受到壓力的作用而附著及阻塞於表面孔洞之中，甚至會阻塞於更深入之孔洞結構之中，當壓力大到某一範圍時，濾速反而會因為粒子嚴重阻塞薄膜孔道而降低；而 Durapore 薄膜因其表面有一表皮層，粒子只能阻塞於表面之表皮層，無法阻塞於更內部之孔道；至於 Isopore 薄膜表面孔隙較少，其形態為一圓孔，粒子不易在表面直接阻塞孔隙，因此其濾速為三種薄膜最高，也是因其之孔隙較少被粒子阻塞，濾液較有機會通過，至於所生成的濾餅性質方面，因為過濾壓差增加，濾

餅會滾落至最穩定的位置，造成濾餅之孔隙度變小，我們還可由 SEM 圖形得到較為清楚的粒子阻塞及堆積情形，可以清楚的看出粒子在聚合物薄膜表面附著，不同表面形態聚合物薄膜對於粒子附著的影響十分明顯。

2. 掃流速度的影響

在固定過濾壓差之下，當掃流速度遞增時，因為粒子較易受到流體拖曳而帶離薄膜表面，對於掃流速度之影響，掃流速度越高（雷諾數為325~1079皆為層流範圍內）可以得到越高的濾速，這是因為掃流速度越高，掃流剪切力增加，使得濾餅不易生成，濾速自然也會較高，這也證明了掃流過濾能抑制濾餅生長的優點。對於掃流速度與操作壓差對其穩定濾速之關係，在不同掃流速度而固定其他操作條件的狀況下，其掃流速度愈大，則其穩定濾速增加的愈明顯。

3. 薄膜表面形態的影響

薄膜種類與操作條件的選擇還是決定過濾效率的重大因素。本研究針對聚合物表面性質加以探討，我們採用三種不同表面形態之聚合物薄膜加以實驗，由此可以瞭解聚合物薄膜之過濾性質，進一步對於不同表面形態薄膜之使用時機加

以判斷，以達到最佳過濾效率之目的。

第八章、建議

基於以上的說明，吾人可以了解薄膜種類與操作條件的選擇是決定過濾效率的重大因素。就過濾的目的而言，可分成回收固體或回收液體及濃縮溶液等等目的。而探討的觀點則就分成固相及液相兩方面，各有其不同種類而需探討的地方。固相物質則因其尺寸及是否可變形而有不同的過濾現象及不同的濾阻，這些濾阻不同主要即是濾餅形成時結構的不同所造成的，其中又以體積小且可變形的粒子(如生物細胞及菌類，有價的膠體微細粒子及污水中欲排除的廢棄膠體粒子)最難處理。但因應科技的發展，此等探討卻是當務之急，若能有所突破，勢必是解決純化技術瓶頸的關鍵。然而，大部分研究者的眼光都放在操作條件上，在薄膜選擇的研究上卻仍相當缺乏。以薄膜進行過濾漸廣泛的在實驗室及工業界使用，這些由纖維酯或高分子合成的膜，其優點除了成本較低廉外，更重要的是它可針對過濾的對象做膜孔洞的選擇，因此像較難過濾的如螺旋體，原生病菌、微細膠體粒子及小至巨型蛋白質等等都能有效的阻擋下來。高分子薄膜之形態有類球形之連結、節點-纖維連結、圓洞孔道、不規則形態等，每一種形態之薄膜對粒子之截取效率、液體滲透率、阻塞容

易度等皆不同。舉凡高分子的材質、形態/結構、空隙之孔徑等，皆可能對微粒子之分離效率有決定性的影響。薄膜之使用時機不僅影響整個實驗的進行，對於經濟上的考量，在薄膜的選擇，必須適合不同過濾物料性質、不同操作條件、所要求之濾液品質及過濾效率，所以進行過濾時，必須先清楚以下幾點要求：

1. 對於過濾物料之酸鹼值、電解度、濃度等性質，要判斷是否對於薄膜在過濾時之效率有所影響。
2. 物料中所含粒子的性質也必須瞭解，如果是生物粒子，例如回收或純化高價位的酵素、藥用蛋白質或荷爾蒙等含有膠質（gelatinous）或易變形之粒子的懸浮液時，即使僅形成甚薄的濾餅層，亦會導致嚴重的濾速衰減。故若操作條件的選擇稍一不慎，便無法持續過濾，導致浪費能源、增加生產成本。過濾後濾液及濾餅的處理，也要符合經濟且安全的考量。
3. 濾液及濾餅之後處理十分花費金錢，所以必須採用適合實驗進行之操作條件，使得之後的處理事半功倍。

致謝

本研究蒙中國石油股份有限公司（計畫編號
88-CPC-032-013）提供經費，特此申謝。

符 號 說 明

F_B : Brownian force	(N)
f_c : friction coefficient	(-)
F_d : frictional drag due to fluid flow	(N)
F_e : electrostatic force	(N)
F_g : gravity force	(N)
F_i : interparticle force	(N)
F_l : inertial lift force	(N)
F_n : drag force due to the filter	(N)
F_r : random force due to the back-diffusion	(N)
F_t : tangential drag force due to the cross flow	(N)
F_v : van der Waals force	(N)
q : filtration rate	($m^3/m^2 \cdot s$)
Re : Reynolds number	(-)
R_m : filtration resistance of filter medium	(1/m)
t : filtration time	(s)
T : temperature	(K)
u : velocity of fluid	(m/s)
u_l : lift velocity of particle	(m/s)
u_m : maximum velocity of fluid	(m/s)
u_s : crossflow velocity of slurry in a crossflow filter	(m/s)
v_a : Local permeating velocity for A particle of fluid at the outer edge of lamilar sublayer in a crossflow filtration	(m/s)
v_b : Local permeating velocity for B particle of fluid at the outer edge of lamilar sublayer in a crossflow filtration	(m/s)

$v^{c_{aoa}}$: reflecting velocity of particle A itself whereas the existance of a wall surface	(m/s)
v_{boa} : reflecting velocity of particle B on particle A	(m/s)
$v^{c_{boa}}$: reflecting velocity of particle B on particle A whereas the existance of a wall surface	(m/s)
V_e : repulsive energy	(J)
V_p : velocity of particle	(m/s)
V_T : total of interaction potential	(J)
V_v : van der Waals potential	(J)

參 考 文 獻

Altena, F.W. and G. Belfort, Chem. Eng. Science, 39(2), 343, (1984).

Anderson, J.L. and C.C. Reed, J. Chem. Phys., 64, 3240, (1976).

Anderson, J.L., R. Rauh and A. Moroles, J. Chem. Phys., 82, 608, (1978).

Arnold, S.T., and G.A. Davies, J. Membrane Sci., 70, 85 (1992).

Belfort, G. and N. Nagata, Desalination, 53, 57, (1985).

Belfort G. et al., J. Membrane Sci., 96, 1 (1994).

Blake, N.J., I.W. Cumming and M. Streat, Proc. 5th World Filtration Congress, p.579, Nice, France, June, (1990).

Blake, N.J., I.W. Cumming and M. Streat, J. Membrane Sci.,
68, 205 (1992)

Blatt, W.F., A. Dravid, A.S. Michaels and L. Nelson,
"Solute Polarization and Cake Formation in Membrane
Ultrafiltration: Causes, Consequences, and Control
Techniques " , Membrane Science and Technology , J.E.
Flinn ed., Plenum Press, New York (1970).

Bridger, K., M. Trdros, W.F. Lu, and F.M. Tiller, Sep.
Sci. Tech., 18, 1417 (1983).

Brites, A.M., and M.N. de Pinho, J. Membrane Sci., 78,
265 (1993).

Chang, D.J., F.C. Hsu, and S.J. Hwang, J. Membrane Sci.,
98, 97 (1995).

Chen, V., K.J. Kim, and A.G. Fane, Biotech. Bioeng., 47,
174 (1995).

Cohen, R.D. and R.F. Probstein, J. Colloid Interface Sci., 114(1),194,(1984).

Cohen, R.D., J. Membrane Sci., 32, 93,(1987).

Cohen, R.D., J. Membrane Sci., 48, 343, (1990).

Davies, G.A. and X. Jia, J. Membrane Sci., 106, 67 (1995).

Davis, R.H. and S.A. Birdsell, Chem. Eng. Commun., 49, 217, (1987).

Davis, R.H. and D.T. Leighton, Chem. Eng. Sci., 42(2), 275, (1987).

Eckstein, E.C., D.G. Bailey and A.H. Shapiro, J. Fluid Mech., 79, 191, (1977).

Elimelech, M., X. Zhu, A. E. Childress, S. Hong, J. Membrane Sci., 127, 101, (1997).

Fane, A.G., C.J.D. Fell, and A.G. Waters, J. Membrane Sci., 16, 211 (1983).

Fischer, E. and J. Raasch, Ger. Chem. Eng., 8, 211, (1985).

Fischer, E. and J. Raasch, Proc. 4th World Filtration Congress, Belgium, p.11.11, (1986).

Gekas, V. and B. Hallstrom, Desalination, 77, 195, (1990).

Green, G. and G. Belfort, Desalination, 35, 129, (1980).

Guenneec, B.L. and V. Milisic,, PCH PhysicoChemical Hydrodynamics, 7(4),183, (1986).

Henry J.D. "Recent Developments of Separation Science", Vol. II, Chap.15, "Cross-Flow Filtration", p.205, N.N.Li ed., Ohio, (1972).

Hermans, P.H., and H.L. Bredee, J. Soc. Chem. Ind., 55, 1T, (1936).

Ho, B.P. and L.G. Leal, J. Fluid Mech., 65(2), 365,
(1974).

Hwang, K.J. and W.M. Lu, J. Chem. Eng. Japan, 29(1), 65
(1996).

Hwang, K.J. and W.M. Lu, J. Chin.I.Ch.E., 28(2), 121
(1997a).

Hwang, K.J., M.C. Yu, and W.M. Lu, Sep. Sci. Technol.,
32(17), 2723 (1997b).

Hwang, K.J. and W.M. Lu, Separation Science and
Technology, 32(8), 1315 (1997c).

Hwang, K.J. and W.M. Lu, J. Chem. Eng. Japan, 30(4), 698
(1997d).

Hwang K. J., H.C. Liu, and Lu W.M., J. Membrane Sci.,
138(2), 181, (1998).

Kim., K.J., A.G. Fane, C.J.D. Fell, and D.C. Joy, J.
Membrane Sci., 68, 79 (1992).

Kim., K.J., A.G. Fane, R. Ben Aim, M.G. Liu, G. Jonsson,
I.C. Tessaro, A.P. Broek, and D. Bargeman, J. Membrane
Sci., 87, 35 (1994).

Iritani, E., Y. Mukai, Y. Takana, T. Murase, J. Membrane
Sci., 103, 181, (1995).

Jiao, D., and Mukul M. Sharma, J. Colloid Interface
Sci., 162, 454, (1994) .

Kawakatsu, T., M. Nakajima, S. Nakao, and S. Kimura,
Desalination, 101, 203 (1995).

Kleinstreuer, C. and T.P. Chin, Chem. Eng. Commun., 28,
193 (1984).

Leighton, D. and A. Acrivos, J. Fluid Mech., 177, 109,
(1987).

Leonard, E.F. and C.S. Vassilieff, Chem. Eng. Comum.,
30, 209, (1984).

Lu, W.M. and S.C. Ju, Separation Sci. Technol., 24, 517,
(1989).

Lu, W.M. and K.J. Hwang, Sep. Technol., 3, 122 (1993)

Lu, W.M., K.J. Hwang, and S.C. Ju, Chem. Eng. Sci., 48,
863, (1993).

Lu, W.M. and K.J. Hwang, A.I.Ch.E. J., 41, 6, 1443
(1995).

Lu, W.M., C.C. Lai and K.J. Hwang, Sep. Technol., 5 ,
45 (1995).

Matthiasson, E., J. Membrane Sci., 16, 23 (1983).

McDonogh R.M., Fell C. J. D. and Fane A.G., J. Membrane
Sci., 21, 285 (1984).

McDonogh, R.M., A.G. Fane and C.J.D. Fell, J. Membrane
Sci., 43, 69 ,(1989).

McDonogh, R.M., K. Welsch, A.G. Fane and C.J.D. Fell,
J. Membrane Sci., 72, 197 ,(1992).

Porter, M.C., A.I.Ch.E. Symp. Ser., 68(120), 21,
(1972a).

Porter, M.C., Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 11, 234,
(1972b).

Rautenbach, R., and G. Schock, J. Membrane Sci., 36, 231,
(1988).

Robertson, B., and A.L. Zydney, J. Colloid Interf. Sci.,
134(2), 564 (1990).

Rodgers, V.G.J., and R.E. Sparks, A.I.Ch.E. J., 37(10),
1517 (1991).

Rodgers, V.G.J., S.F. Oppenheim, and R. Datta, A.I.Ch.E.
J., 41(7), 1826 (1995).

Romero, C.A. and R.H. Davis, J. Membrane Sci., 39, 157,
(1988).

Rushton, A., M. Hosseini and Alan Rushton, Filtra. & Separ., Sep/ Oct, 459 (1979).

Schmitz, P., C. Gouverneur, D. Houi and M. Madianos, Proc. 5th World Filtration Congress, p.571, Nice, France, June, (1990).

Schmitz, P., B. Wandelt, D. Houi and M. Hildenbrand, J. Membrane Sci, 84, 171, (1993).

Schulz, G. and S. Ripperger, J. Membrane Sci., 40, 173, (1989).

Shirato, M.K. Osasa and Y. Takaoku, Kagak Kojaku, 34, 773, (1970).

Tiller F.M., Chem. Eng. Prog., 51, 282 (1955).

Ueshima, K., H. Hzuka, and K. Higashitani, J. Chem. Eng. Japan, 24, 647 (1991).

Wiesner, M.R., M.M. Clark and J. Mallevalle, J. Environmental Eng., 115(1), 20, (1989).

Wu, Q., and B. Wu, J. Membrane Sci., 105, 113 (1995).

Zydney, A.L. and C.K. Colton, Chem. Eng. Commun. 47, 1,
(1986).

Zydney, A.L. and C.C. Ho, J. Membrane Sci., 155, 261,
(1999).

附錄

附錄 A 實驗物料的種類及物性

A.1 聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethly methacrylate, PMMA)

粉體

□ 粉體由日本 Soken Chemical & Engineering Co.,Ltd 生產。

□ 其外觀為白色粉體，其粒子形狀為球形。

□ 使用粉體粒徑有兩種，分別為 $0.25\mu\text{m}$ 及 $0.4\mu\text{m}$ 。

□ 密度： $\rho_p = 1210\text{kg/m}^3$

□ pH 值：粉體懸浮於去離子水中，懸浮液呈現微酸性，pH 值約為 $5.0 \sim 7.0$ 。

A.2 濾材

□ 美商 Millipore 生產之三種薄膜，分別為 MF-Millipore (Mixed cellulose esters) 、 Durapore (Modified polyvinylidene difluoride) 及 Isopore (Bisphenol polycarbonate) ，其分別之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 結構圖，如 Fig.A-1~3 所示。

□ 平均孔徑均為 $0.1\mu\text{m}$ 。

□ 濾材厚度及孔隙度：

MF-Millipore	125 μm	84% ($8\mu\text{m}$) - 70% ($0.025\mu\text{m}$)
--------------	-------------------	---

Durapore	125 μm	70%
----------	-------------------	-----

Isopore	6-10 μm	5% - 20%
---------	--------------------	----------

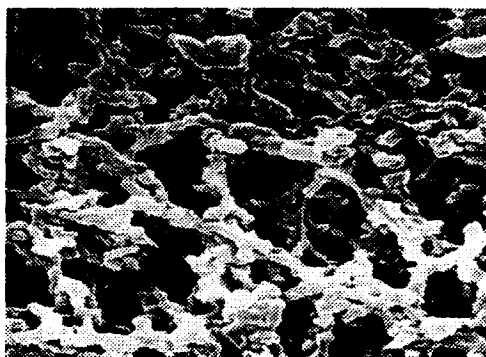


Fig.A-1 The SEM picture of MF-Millipore membrane

(5,000 ×)

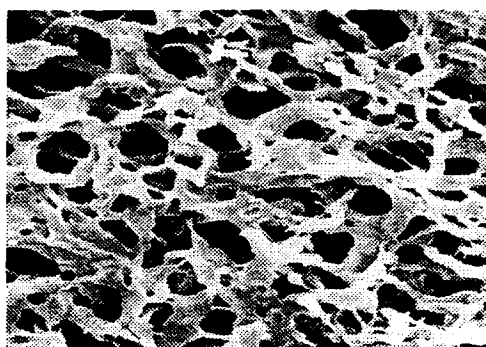


Fig.A-2 The SEM picture of Durapore membrane

(5,000 ×)



Fig.A-3 The SEM picture of Isopore membrane

(10,000 ×)

附錄 B 實驗數據計算式

B.1 薄膜阻力： R_m 之求法

使用純水做過濾實驗，由過濾基本公式

$$q_0 = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} w_c + R_m)} \quad (B-1)$$

因為 $w_c = 0$ (無濾餅生成)，則

$$q_s = \frac{\Delta p}{\mu R_m} \quad (B-2)$$

$$\Rightarrow R_m = \frac{\Delta p}{q_0 \mu} \quad (B-3)$$

其中黏度 $\mu = 0.001 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ ， q_0 為過濾速率， Δp 為過濾壓差。

Table B-1 即為實驗中所得三種薄膜 R_m 值隨不同過濾壓差之變化。

Table B-1 The value of R_m of three membranes

under different operation conditions.

ΔP (kPa)	20	40	60	80	100	120	140	160	180
MF-Millipore	0.795	1.01	1.05	1.085	1.11	1.23	1.29	1.37	1.45
Durapore	0.8	0.96	1.01	1.05	1.13	1.31	1.33	1.38	1.47
Isopore	0.81	1.02	1.09	1.24	1.52	1.67	1.85	2.11	2.28

註：表中所列為 $R_m \times 10^{-11}$ 之值，單位為 m^{-1}

B.2 平均孔隙度 ε_{av} 之求法

由實驗結束後所獲得之濕乾濾餅重比及孔隙度的定義

$$m = \frac{(1 - \varepsilon_{av})\rho_p + \varepsilon_{av}\rho_l}{(1 - \varepsilon_{av})\rho_p} \quad (B-4)$$

其中 $m = \frac{w_F}{w_C}$ ， w_F 為濕濾餅重， w_C 為乾濾餅重

由 (B-4) 即可求出濾餅的平均孔隙度。

B-3 平均過濾比阻 α_{av} 之求法

$$q_s = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} w_c + R_m)} \quad (B-5)$$

其中 q_s 為擬穩態 (pseudo steady state) 濾速，整理得

$$\Rightarrow \alpha_{av} w_c + R_m = \frac{\Delta p}{q_s \mu} \quad (B-6)$$

$$\Rightarrow \alpha_{av} = \frac{\Delta p}{q_s \mu w_c} - \frac{R_m}{w_c} \quad (B-7)$$

其中 R_m 可由 (B-3) 求出。即可由 (B-7) 式求得平均過濾比阻 α_{av} 。